

Jan Vytlačil

Vypracování metodiky zjišťování zbytkové deformace výlisku z pevnostních plechů

Diplomová práce

2006

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vypracování metodiky zjišťování zbytkové deformace výlisku z pevnostních plechů.

Elaboration of methodic to determination of residual deformation in stamping from high-strength sheet metals

Jan Vytlačil

KSP – TP - 773

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. Dalibor Keller (Škoda Auto a.s.)

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 63

Počet tabulek: 22

Počet příloh: 5

Počet obrázků: 25

Počet výkresů: 1

Datum: 26.05.2006



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Studijní rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Jan VYTLAČIL**

Studijní program M 2301 Strojní inženýrství

Obor 2303T002 Strojírenská technologie

Zaměření Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Vypracování metodiky zjišťování zbytkové deformace výlisku z pevnostních plechů

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Charakteristika pevnostních materiálů používaných pro stavbu karoserie automobilu.
2. Seznámení se s problematikou zpracování plechů se zvýšenými pevnostními hodnotami.
3. Návrh metodiky zjištění zbytkové deformace výlisků z pevnostních plechů
4. Experimentální zjištění zbytkové deformace u zvoleného výlisku z plechu
5. Vyhodnocení vhodnosti použití zvolené metodiky měření
6. Závěr

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva cca 50 stran
- grafické práce

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- /1/ PEARCE,P.: Sheet Metal Forming, ISBN 0-7503-0101-5
- /2/ BOLJANOVIC,V.: Sheet Metal Forming Processes and Die Design, New York 2004 , ISBN 0-8311-3182-9
- /3/ Worldautosteel, International Iron And Steel Institute: Technical Info, 2004. Dostupné z <<http://www.worldautosteel.org/>>.
- /4/ NewSteelBody For a lighter automotive future. Dostupné z <<http://www.thyssenkrupp-steel.com/auto/>>.
- /5/ BILLY, J.: Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie. In.: Hutnícké listy 1999. Vol 3, s 16-21.
- /6/ PETRUŽELKA, J. – BŘEZINA, R.: Tvařitelnost kovových materiálů, VŠB, Ostrava 2001.
- /7/ VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. SNTL Praha 1989.
- /8/ ČSN – EN 10002-1: Kovové materiály. Statická zkouška tahem, 2002

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk Ph.D. – TU v Libereci

Konzultant diplomové práce: Ing. Dalibor Keller (Škoda Auto a.s.)

L. S.

doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld
vedoucí katedry

doc. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant: Jan Vytlačil
Téma práce: Vypracování metodiky zjišťování zbytkové deformace
výlisku z pevnostních plechů.

Elaboration of methodic to determination of residual
deformation in stamping from high-strength sheet
metals

Číslo DP: KSP – TP - 773
Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk Ph.D. – TU v Liberci
Konzultant: Ing. Dalibor Keller (Škoda Auto a.s.)

Abstrakt: Diplomová práce se zabývala problematikou zpracování vysokopevnostních plechů. Je zde uveden stručný přehled a charakteristika pevnostních materiálů používaných v automobilovém průmyslu. Praktická část je zaměřena na návrh a vypracování metodiky zjištění zbytkové plastické deformace u daného výlisku.

Abstract: This thesis deals with questions of fabrication of high-strength sheet metals. There are listed short abstract and characteristic of this materials used in automotive field. The practical part is focused on elaboration of methodic to determination of residual deformation in given example of stamping

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.“

V Liberci 26.června 2006

.....

Jan Vytlačil

Poděkování:

Na začátku této práce bych rád poděkoval Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D., Ing. Lukáši Kovárníkovi a ostatním členům Katedry strojírenské technologie za pomoc při vypracování této diplomové práce.

OBSAH

Seznam symbolů a zkratk	9
1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČÁST:	11
2.1 Charakteristika oceli	11
2.1.1 Vliv jednotlivých prvků	11
2.2 Rozdělení ocelí	12
2.2.1 Hlubokotažné oceli	13
2.2.2 Pevnostní oceli	14
2.2.2.1 IF oceli s BH efektem	14
2.2.2.2 Uhlík-manganové oceli	14
2.2.2.3 Mikrolegované oceli	14
2.2.3 Vysokopevnostní oceli	14
2.2.3.1 Vícefázové oceli	15
2.2.3.1.1 DP oceli	15
2.2.3.1.2 Trip oceli.....	15
2.2.3.1.3 CP oceli	16
2.2.3.1.4 MS - W oceli	17
2.2.3.2 TWIP oceli	17
2.2.3.3 Mangan - borové oceli	18
2.3 Anizotropie plechů	18
2.4 Mechanismy zpevňování	20
2.4.1 Vytvrzení tuhým roztokem	20
2.4.2 Mechanické zpevnění	20
2.4.3 Zpevnění vlivem zjemnění zrna.....	21
2.4.4 Precipitační vytvrzení	21
2.4.5 Zpevnění pomocí BH efektu	21
2.4.6 Využití TRIP efektu	23
2.4.7 Využití TWIP efektu	23
2.4.8 Zvýšení pevnosti u dvou a vícefázové struktury	23
2.5 Tváření vysokopevnostních ocelí	24
2.5.1 Tepelně mechanické zpracování	24
2.5.2 Tváření plechů	24

2.5.2.1	Roll forming	25
2.5.2.2	Hydro forming	25
2.5.2.3	Konvenční lisování	25
2.5.2.4	Tváření za tepla	25
2.6	Použité zkoušky	26
2.6.1	Tahová zkouška	26
2.6.2	Zkouška rázem.....	26
2.6.3	Zkouška tvrdosti	26
2.6.4	Zkouška ohybem	26
2.6.4.1	Důvod změny hodnoty meze kluzu	27
3	PRAKTICKÁ ČÁST	28
3.1	Úvod	28
3.2	Zkouška tahem	29
3.2.1	Zkušební vzorky:	29
3.2.1.1	Příprava vzorků:	30
3.2.2	Zkušební zařízení:	30
3.2.3	Mechanické hodnoty	32
3.2.4	Deformace jednotlivých materiálů:	33
3.3	Zkouška tvrdosti:	34
3.3.1	Tvrdost podle Vickerse.....	34
3.3.2	Příprava vzorků	35
3.3.3	Zkoumané materiály, výsledky zkoušek	35
3.3.3.1	RAK ocel.....	36
3.3.3.2	CP-W ocel.....	37
3.3.3.3	MS-W ocel.....	38
3.3.4	Vyhodnocení měření	39
3.4	Zkouška rázem	40
3.4.1	Příprava vzorků pro rázovou zkoušku:	41
3.4.2	Zkoumané materiály, výsledky zkoušek	42
3.4.2.1	RAK ocel.....	43
3.4.2.2	CP-W ocel.....	44
3.4.2.3	MS-W ocel	45
3.4.3	Vyhodnocení měření	45

3.5	Zkouška ohybem:	47
3.5.1	Postup zkoušky	47
3.5.1.1	RAK ocel	49
3.5.1.2	CP-W ocel	51
3.5.1.3	MS-W ocel	52
3.5.2	Vyhodnocení měření:	53
3.6	Ověření metodiky na výlisku z vysokopevnostní oceli	54
3.6.1	Vysokopevnostní výztuha	54
3.6.2	Mechanické hodnoty	54
3.6.3	Zkouška tahem	54
3.6.4	Zkouška rázem	55
3.6.4.1	Zhodnocení:	56
3.6.5	Zkouška ohybem	56
3.6.5.1	Zkušební vzorky	57
3.6.5.2	Kalibrační křivka	58
3.6.5.3	Nalezení hodnoty vyčerpané plasticity	59
3.6.5.4	Vyhodnocení měření	59
4	DISKUZE ŘEŠENÍ	60
5	ZÁVĚR	62
6	POUŽITÁ LITERATURA	63

Seznam použitých zkratk a symbolů:

r	[-].....	koeficient plošné normálové anizotropie
Δr	[-].....	koeficient plošné anizotropie
R _{p0,2}	[MPa].....	mez kluzu
R _m	[MPa].....	mez pevnosti
A	[-]	tažnost
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
h	[mm]	hloubka ohybu
S	[mm ²]	průřez vzorku
E	[J]	rázová práce (energie)
E _p	[J/mm ²]	rázová práce přepočtená na průřez vzorku
P	[%]	vyčerpaná plasticita
P _~	[%]	schopnost zbytkové plastické deformace

1 ÚVOD

Ve strojírenství se klade stále větší důraz na materiály. Nejrozšířenějším materiálem používaným v konstrukci dopravních prostředků je ocel. S rozvojem vědy, získáváme stále lepší pohled do metalurgického procesu výroby a pomocí těchto poznatků umíme zhotovit stále více specializované oceli. Velkou výhodou oceli proti ostatním konstrukčním materiálům (plasty, neželezné kovy) je jejich cena. Nevýhodu můžeme vidět v jejich velké měrné hmotnosti.

V automobilovém průmyslu je kladen stále větší důraz na bezpečnost vozidla. Bezpečnost automobilu zajišťuje správně navrhnutá karoserie. Materiály použité ve stavbě samonosné karoserie můžeme rozdělit na dvě skupiny. Vysokoplastické absorbují při deformaci (nárazu) co nejvíce energie, čímž snižují přetížení přepravovaných osob a druhou skupinou jsou materiály vysokopevnostní, ty zajišťují nosnost, tuhost a bezpečnost celé karoserie. Požadovanými vlastnostmi jsou zvýšená mez kluzu a co nejvyšší mez pevnosti při zachování dobré tvárnosti.

Teoretická část diplomové práce se zaměří na zkoušky, které by mohly vést k zjištění metodiky – „**určování schopnosti zbytkové plastické deformace**“. Jedním z problémů u vysokopevnostních plechů tvářených za studena spočívá v obtížném zjištění, jakou část plasticity jsme využili již při samotné výrobě výlisku. V praktické části se zaměřím na provedení jednotlivých zkoušek vedoucích ke zjištění zbytkové deformace a ověření metodiky na výlisku z vysokopevnostního plechu (výztuha prahu) a jejich následného porovnání a vybrání nejprůkaznější metody.

2 TEORETICKÁ ČÁST:

2.1 Charakteristika oceli [1]

V ocelích jsou přítomny kromě železa – Fe a uhlíku – C další prvky, které významným způsobem ovlivňují vlastnosti. Některé prvky jsou přítomné vždy a to v množství souvisejícím s výrobou a použitými surovinami – jedná se o prvky *doprovodné*. Tyto prvky se dělí na prvky *škodlivé* (síra – S, fosfor – P, kyslík – O, vodík – H, ..) a prvky *prospěšné* (mangan – Mn, křemík – Si).

Druhou skupinou prvků tvoří ty, jež dáváme do ocelí úmyslně, za účelem upravení některých vlastností. Nazýváme je prvky *legující* (přísadové, slitinové).

2.1.1 Vliv jednotlivých prvků [1]

Doprovodné prvky, které se dostali do oceli při výrobě.

Síra vytváří sulfid železitý (FeS), který zhoršuje vrubovou houževnatost, tvářitelnost za studena a korozní odolnost. Nepříznivý vliv síry lze částečně eliminovat přidáním manganu – Mn (popř. titanu – Ti či kovy vzácných zemin).

Fosfor v oceli způsobuje lámavost za studena, snižuje vrubovou houževnatost, zhoršuje svařitelnost.

Kyslík pokud je rozpuštěn v oceli v koncentraci větší než 0.01% zvyšuje tvrdost a křehkost. Vliv kyslíku vázaného ve vměstcích (oxidy, křemičitany) závisí na tvaru vměstků. Jemně vyloučené vměstky působí příznivě (zjemnění struktury). Větší množství zvláště hrubších vměstků způsobuje sklon k únavovým lomům, heterogenitu vlastností po tváření, vznik trhlin při tepelném zpracování a sklon k bodové korozi.

Vodík má silný sklon k segregaci, V ocelích se vodík rozpouští pouze v atomárním stavu, s klesající teplotou jeho rozpustnost klesá. Přebytečný vodík se vylučuje v molekulární formě a vyvolává ve svém okolí silné napětí vedoucí k vzniku trhlinek. Rozpuštěný vodík snižuje tažnost kontrakci a vrubovou houževnatost – tzv. „vodíková křehkost“.

Dusík vytváří intersticiální tuhý roztok. Jeho rozpustnost v železe α je kolem 0,1 %, s klesající teplotou rychle klesá a vylučuje se ve formě nitridu železa (Fe₄N). Ty se vylučují přednostně na hranicích zrn a ve skluzových pasech, čímž zabraňují pohybu dislokací. Tím dochází k výraznému navýšení

meze kluzu při zachované mezi pevnosti, dále k významnému poklesu vrubové houževnatosti a tvárnosti za studena – „**stárnutí ocelí**“.

Uhlík má také významný vliv na stárnutí ocelí. U materiálů určených k tváření se snažíme, aby obsah obou prvků byl co nejmenší.

Mangan a křemík patří do skupiny prvků prospěšných, tyto prvky desoxidují ocel a váží škodlivé prvky v přijatelné formě.

Mangan v oceli zvyšuje tvrdost, pevnost i houževnatost. Malá část manganu je vázána v cementitu, který se tímto stabilizuje.

Křemík zvyšuje pevnost feritu, zhoršuje však tvárnost za studena.

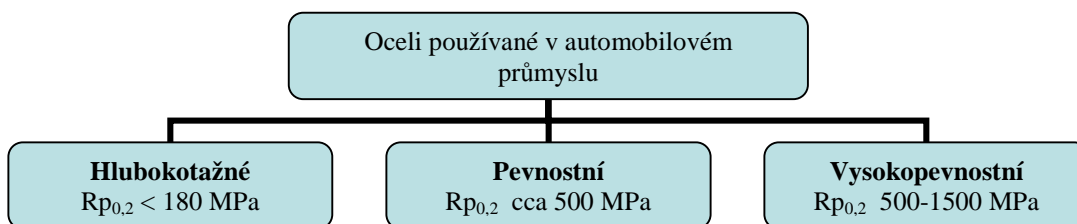
Legující (přísadové) prvky jsou prvky, které se do ocelí přidávají úmyslně za účelem zlepšení některých vlastností. Je to např. k zvýšení tvrdosti a pevnosti při vyhovující tvárnosti, zlepšení prokalitelnosti, ovlivnění velikosti zrna, zlepšení korozní odolnosti a další.

Mezi významné legující prvky patří Chrom – Cr, nikl - Ni, mangan – Mn, křemík – Si, molybden – Mo, titan - Ti, hliník – Al a další. Požadované vlastnosti získáme vhodnou kombinací těchto prvků.

2.2 Rozdělení ocelí [2]

Ocelí používaných v automobilovém průmyslu je velké množství. Od hlubokotažných, pevnostních k vysokopevnostním s mezí pevnosti až nad 1200 MPa. Mezi hlavní výhody ocelí můžeme řadit dobrou tvárnost a svařitelnost. Dalšími klady jsou velká dostupnost, recyklovatelnost či nižší cena vůči alternativním materiálům nejčastěji neželezným kovům. Mezi nevýhody můžeme řadit velkou měrnou hmotnost či nutnost ochrany proti korozi. V následujícím výkladu bude sestaven souhrn nejdůležitějších ocelí.

Rozdělení na pevnostní a vysokopevnostní oceli není zcela správné. Není dána hranice meze pevnosti či meze kluzu oddělující tyto dvě skupiny.



2.2.1 Hlubokotažné oceli [2]

Jedná se o nízkouhlíkové oceli určené pro hluboké a extrahluboké tažení s obsahem uhlíku max. 0,1%, které jsou legovány Mn v rozmezí 0,35-0,40%. Obsah ostatních prvků je minimální. Mají feritickou strukturu s jemnými lamelami karbidu železa, rozloženými podél feritických zrn.

Hlubokotažné oceli jsou jedny z nejpoužívanějších kovových materiálů používaných na stavbu karoserie. Tyto materiály se dále dělí do 5 kvalitativních skupin, dle mechanických hodnot.

- CQ plechy běžné kvality (**C**omercial **Q**uality)
- DQ tažné plechy (**D**rawing **Q**uality)
- DDQ hlubokotažné plechy (**D**eep **D**rawing **Q**uality)
- EDDQ zvlášť hlubokotažné plechy (**E**xtra **D**eep **D**rawing **Q**uality)
- EDDDQ - S super hlubokotažné (**E**xtra **D**eep **D**rawing **D**uality – **S**uper)

Tažnost (A_{80}) se u těchto materiálů pohybuje 25 - 50 (%), mez kluzu do 250 MPa u plechů běžné kvality. Důležitým parametrem u tažných plechu je *koeficient normálové anizotropie* – \bar{r} [-] viz. kap. 2.3

IF oceli

Jedná se o oceli bez intersticií, pochází z anglického názvu **I**nterstitial – **F**ree.

Tyto materiály dosahují velice dobrého poměru tažností ku pevnosti. Mají interstiticky rozpustné atomy uhlíku a dusíku vázané ve stabilních karbonitridech (TiCN, NbCN) prováděné mikrolegováním Nb či Ti anebo kombinací těchto dvou prvků. Snížením obsahu uhlíku a dusíku ve formě tuhého roztoku docílíme výrazného zlepšení plastických vlastností ocelí.

Z chemického složení se jedná téměř o čisté železo. Mechanické hodnoty jsou poměrně nízké. Mez pevnosti je okolo 300 MPa a mez kluzu 150 MPa.

2.2.2 Pevnostní oceli [2]

Jedná se o materiály s mezí kluzu do cca 500 MPa. Nejznámějšími zástupci jsou IF oceli, BH oceli a mikrolegované oceli.

2.2.2.1 IF oceli s BH efektem [2]

Používají se v místech, kde potřebujeme lepší mechanické vlastnosti (zvýšení meze kluzu) než u klasických IF ocelí. IF oceli vykazující BH efekt se vyvinuli z důvodu zachování dobré tažnosti a díky vytvrzení zlepšení mechanických hodnot. Jedná se jev, který spočívá ve zvýšení meze kluzu při teplotě cca 170°C. Velikost BH efektu je z hlediska chemického složení závislá na obsahu uhlíku, manganu a síry. Zvýšení meze kluzu bývá mezi 30 - 80 MPa.

2.2.2.2 Uhlík-manganové oceli [2]

V uhlíkových ocelích (0,1-0,25%C) se pohybuje obsah manganu v rozmezí od 1,2% do 1,8%. Přidává se z důvodu zlepšení prokalitelnosti, houževnatosti a pevnosti v tahu, která může dosahovat hodnot až 600 MPa. Uhlík-manganové oceli se vyznačují dobrou svařitelností.

2.2.2.3 Mikrolegované oceli [2]

Tyto oceli mají velmi malý obsah uhlíku. Jsou mikrolegovány prvky jako jsou Al, Mo, Ti, V, Nb a B, které tvoří rovnoměrně rozložené nitridy či karbidy. Své mechanické vlastnosti získávají kombinací různých legujících prvků a vhodným vyvážením jejich množství.

2.2.3 Vysokopevnostní oceli [2]

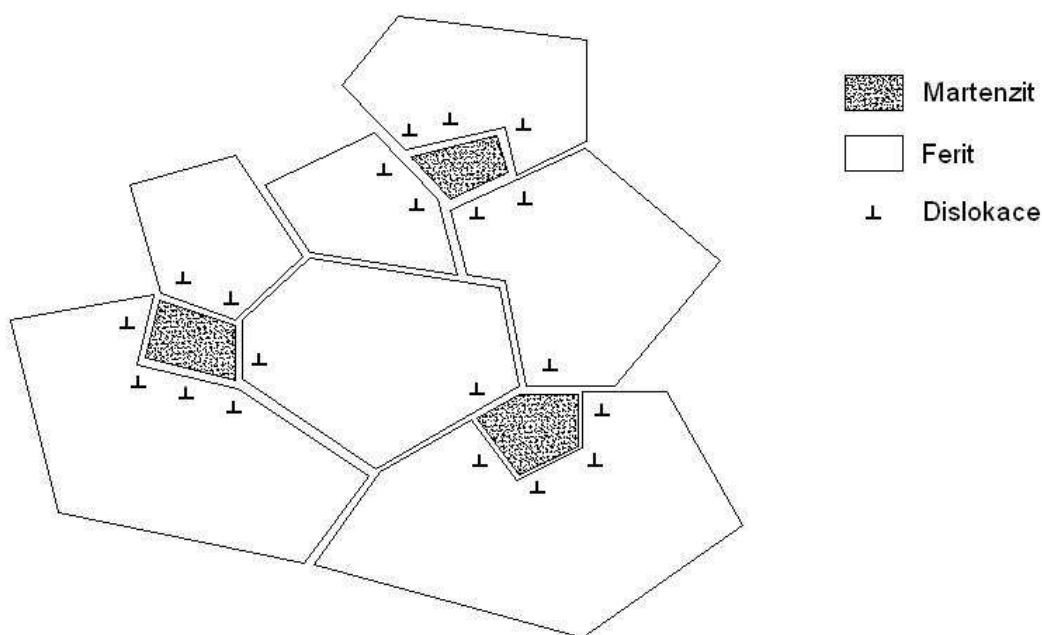
Do této kategorie spadají oceli s nejvyšší pevností. Hodnoty meze pevnosti jsou asi od 500 MPa až do hodnot kolem 1500 MPa. Nejznámějšími představiteli jsou vícefázové oceli (DP, TRIP, CP a MS – W), mangan-borové oceli či TWIP oceli.

2.2.3.1 Vícefázové oceli [2]

Spadají sem oceli o vyšších pevnostech a to přibližně od 500 MPa. Struktura je tvořena vždy alespoň dvěma fázemi, a to měkkší (feritickou) a tvrdší (bainitickou či martenzitickou).

2.2.3.1.1 DP oceli [2]

DP oceli (**d**ual **p**hase) mají feritickou matici, v které jsou obsaženy malé ostrůvky martenzitu (až 25%). Množství martenzitu (bainitu) a jeho rozložení v měkké feritické matici je rozhodující pro pevnost materiálu. Dobrou tažnost DP ocelí zajišťuje měkká fáze ferit. Ve feritu se koncentruje napětí, které zapříčiňuje zpevňování této fáze. U těchto ocelí lze dosáhnout dobrých mechanických hodnot, kdy mez kluzu nedosahuje ani 70% meze kluzu. Toto snižuje riziko výrazného ztenčení stěny vlivem velkého deformačního zpevnění materiálu.

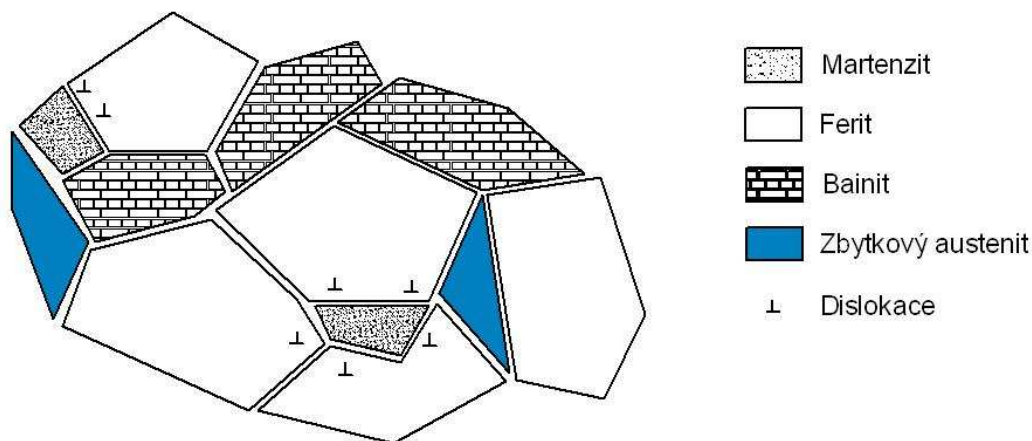


Obr.č. 1 Struktura DP oceli

2.2.3.1.2 Trip oceli [2]

Trip oceli se vyznačují dobrou tvárností a vysokou tažností. Tato ocel využívá přeměny zbytkového austenitu na tvrdší fáze. Struktura oceli je tvořena feritem, bainitem a zbytkovým austenitem. Materiál je před tvářením tvořen feritickou maticí, v které je obsažen tvrdý horní bainit spolu se zbytkovým metastabilním austenitem ve formě ostrůvků. Austenit se během samostatného tváření stabilizuje nebo přemění v martenzit. Trip oceli obsahují

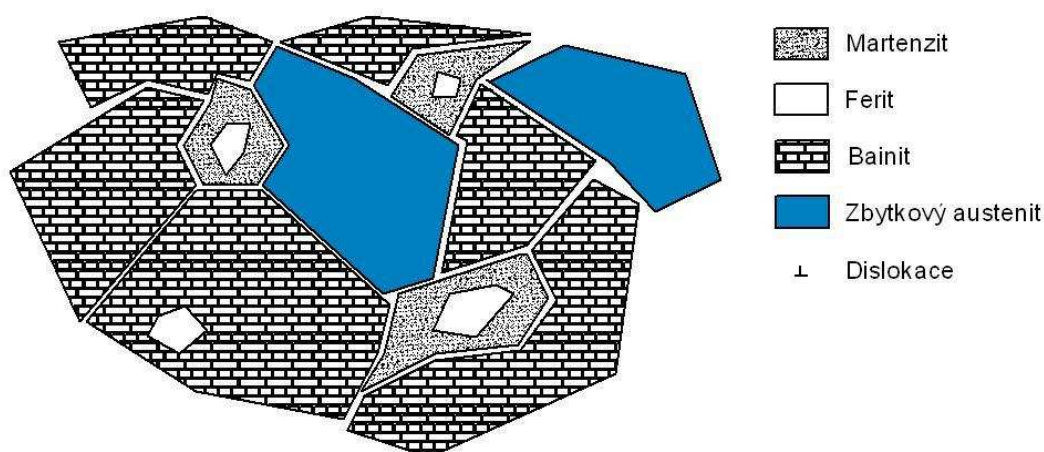
větší množství uhlíku, křemíku a hliníku než DP oceli. Množství uhlíku má vliv na změnu austenitu v martenit. Při nižším obsahu uhlíku je zbytkový austenit přeměněn v martenit již při samotném procesu tváření, což zapříčiní vysoké zpevnění během procesu lisování. Na druhou stranu při vysokém obsahu uhlíku se austenit po lisování stabilizuje a začne se přeměňovat až při vnesení další deformace. Tímto mechanismem zvyšujeme schopnost materiálu pohltit deformační energii.



Obr.č. 2 Struktura TRIP oceli

2.2.3.1.3 CP oceli [2]

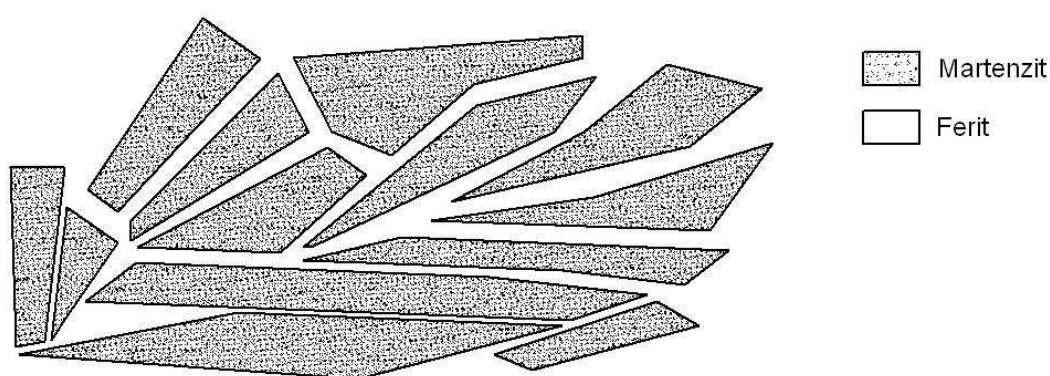
Další vícefázovou ocelí je CP (**complex phase**), která se vyznačuje jemnozrnnou strukturou. Je tvořena feritem, bainitem, martenitem a austenitem. Na rozdíl od DP a TRIP ocelí je navíc mikrolegována Nb, Ti anebo V pro tvorbu jemného precipitátu. Ten se využívá na zpevnění. Dále se využívá strukturálního zpevnění a BH efektu. CP oceli mají dobrou svařitelnost a velmi dobrou rozměrovou stálost výlisku. Dále se vyznačují dobrou schopností absorbovat deformační energii.



Obr.č. 3 Struktura CP oceli

2.2.3.1.4 MS - W oceli [2]

Oceli vhodné ke kalení, nebo-li také martenzitické patří mezi oceli s nejvyšší mezí pevnosti. V ocelích vhodných ke kalení je obsažen austenit, který během válcování za tepla nebo žíhání a následného prudkého ochlazení se transformuje téměř všechen na martenzit. Stejný efekt lze dosáhnout i následnou tepelnou úpravou po tváření. Tyto oceli jsou popouštěny pro zlepšení tažnosti. Tento materiál je možné ohýbat i lisovat. Vyznačuje se dobrou svařitelností a odolností proti opotřebení.



Obr.č. 4 Struktura MS-W oceli

2.2.3.2 TWIP oceli [2]

Jedná se o moderní austenitickou ocel s vysokým obsahem (až 25%) manganu, křemíku či hliníku. Vyniká skvělými mechanickými hodnotami, mez pevnosti může dosahovat až 1200 MPa a tažnost přesahuje 50%. Díky

vysoké tažnosti těchto ocelí mají konečné produkty ještě možnost se deformovat bez porušení materiálu. Jedná se o materiál budoucnosti.



Obr.č. 5 Ukázka schopnosti deformace u TWIP oceli

2.2.3.3 Mangan - borové oceli [2]

Většinou mají feriticko - perlitickou strukturu a řadí se do skupiny ocelí vhodných ke kalení, před tepelným zpracováním mají menší mechanické hodnoty. Pevnost (R_m cca 500 MPa) a dobrá tvárnost ($A_{80}=\min 20\%$), což zaručuje dobrou tvárnost za nižších pracovních sil.

Při tlakovém vytvrzování je ocel zahřátá do oblasti austenitu a při následném řízeném ochlazení se vytvoří martenzitická struktura, díky čemuž se zvýší mez pevnosti až přes 1500 MPa

2.3 Anizotropie plechů [3]

Anizotropií se rozumí nestejnomyšlnost vlastností v různých směrech souřadného systému. Při posuzování anizotropie je materiál považován za homogenní, charakterizovaný třemi ortogonálními osami anizotropie, za materiál ortogonálně anizotropní neboli ortotropní.

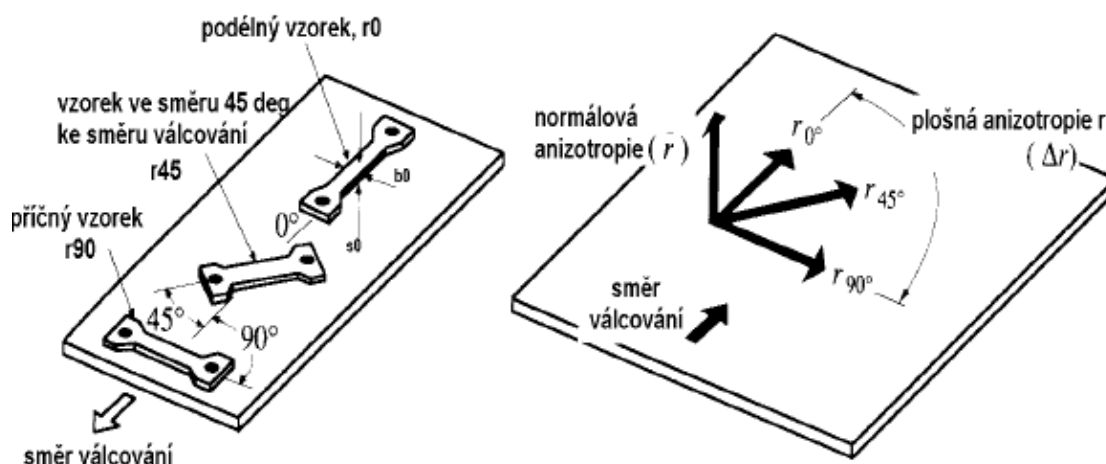
Osa x se ztotožňuje se směrem válcování, který se označuje jako směr 0. Při posuzování anizotropie plechů se rozlišuje anizotropie plošná (v rovině plechu) a normálová (ve směru tloušťky plechu).

Metodika výpočtu *plošné normálové anizotropie* z hodnot v jednotlivých směrech:

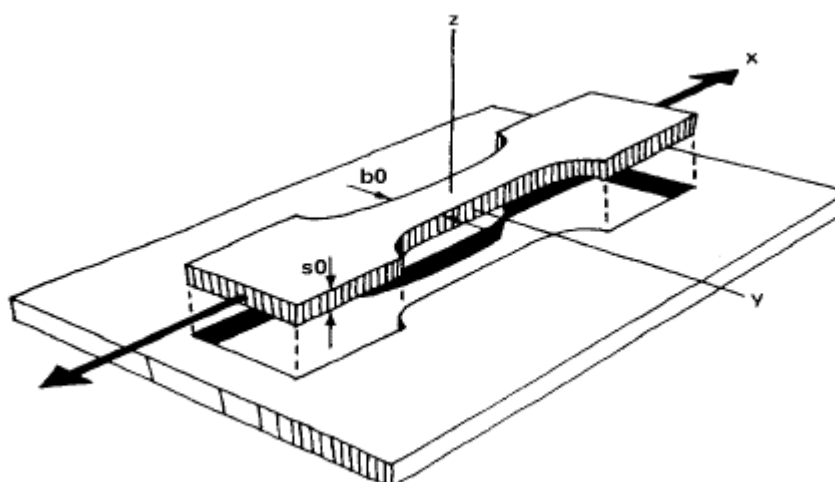
$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4}$$

Metodika výpočtu *plošné anizotropie* z hodnot v jednotlivých směrech:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2 \cdot r_{45}}{2}$$



Obr.č. 6 Orientace odběru vzorků pro zjištění normálové anizotropie ve směrech 0,45 a 90° a ukázka plošné anizotropie



Obr.č. 7 Příklad vzorku při zjištění plošné normálové anizotropie

Plošná normálová anizotropie se kvantitativně určuje bezrozměrným směrovým součinitelem normálové anizotropie:

$$r_{\alpha} = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{l_k \cdot b_k}{l_0 \cdot b_0}} \quad (1)$$

Kde:

r_{α} je směrová hodnota r
 b je šířka vzorku
 s je tloušťka vzorku

Anizotropní jsou, (díky rozdílné vzdálenosti atomů v různých krystalografických rovinách a směrech a z toho vyplývajících rozdílných

vazebných mezi atomárních sil), už monokrystaly kovů. Z technického hlediska je předmětem zájmu zejména anizotropie mechanických a jmenovitě plastických vlastností polykrystalických kovových materiálů.

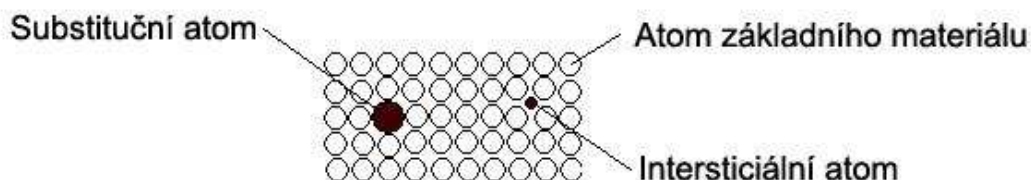
Rozhodující vliv na anizotropii má textura, definovaná jako pravidelné geometrické a krystalografické uspořádání struktury a substruktury polykrystalického kovu.

2.4 Mechanismy zpevňování [2]

Pro zvýšení pevností ocelí se používá několik mechanismů zpevnění, které se navzájem prolínají. Nejčastější metodou je mechanické zpevnění (tj. tváření), dalšími jsou tepelně mechanické zpevnění, změna struktury či zpevnění vlivem tepla.

2.4.1 Vytvrzení tuhým roztokem [2]

Prvky schopné tvořit intersticiální tuhé roztoky (například C, N, Mn, B, P) ve feritové matici oceli. Díky rozdílným velikostem atomů železa a vnesených prvků probíhá deformace mřížky a tím vznikají pružné síly. Zpevnění vzniká tím, že dislokace potřebují dostatečnou energii na překonání těchto překážek.



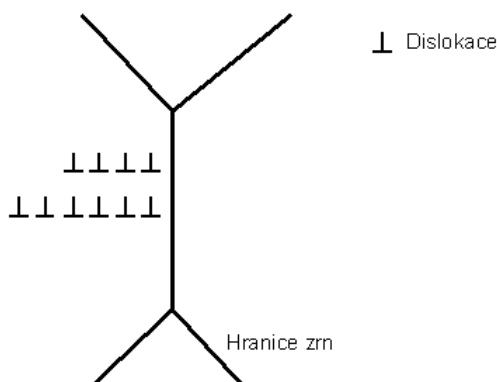
Obr.č. 8 Vytvrzení tuhým roztokem

2.4.2 Mechanické zpevnění [2]

Tváření je realizováno pohybem atomů krystalové mřížky. Nepřesouvají se všechny, ale pouze ty, které mají výhodnou skluzovou rovinu. Plastická deformace v kovech probíhá vzájemným skluzem krystalových bloků podél skluzových rovin. Atomy se po překročení kritického smykového napětí posunou o celistvý násobek meziatomových vzdáleností. Zpevnění materiálu dosáhneme pokud ztížíme tento pohyb – snížíme schopnost pohybu dislokací v materiálu.

2.4.3 Zpevnění vlivem zjemnění zrna [2]

Pro dislokace je nepřekonatelnou překážkou hranice zrn. Zjemněním zrna docílíme, že je těchto překážek více a tím zamezíme pohybu dislokací, které se kupí na těchto překážkách. Hromaděním dislokací se zvyšuje napětí potřebné na další deformaci. Zmenšení zrna vede k zvýšení meze kluzu.



Obr.č. 9 Schematické znázornění hromadění dislokací na hranicích zrn

2.4.4 Precipitační vytvrzení [2]

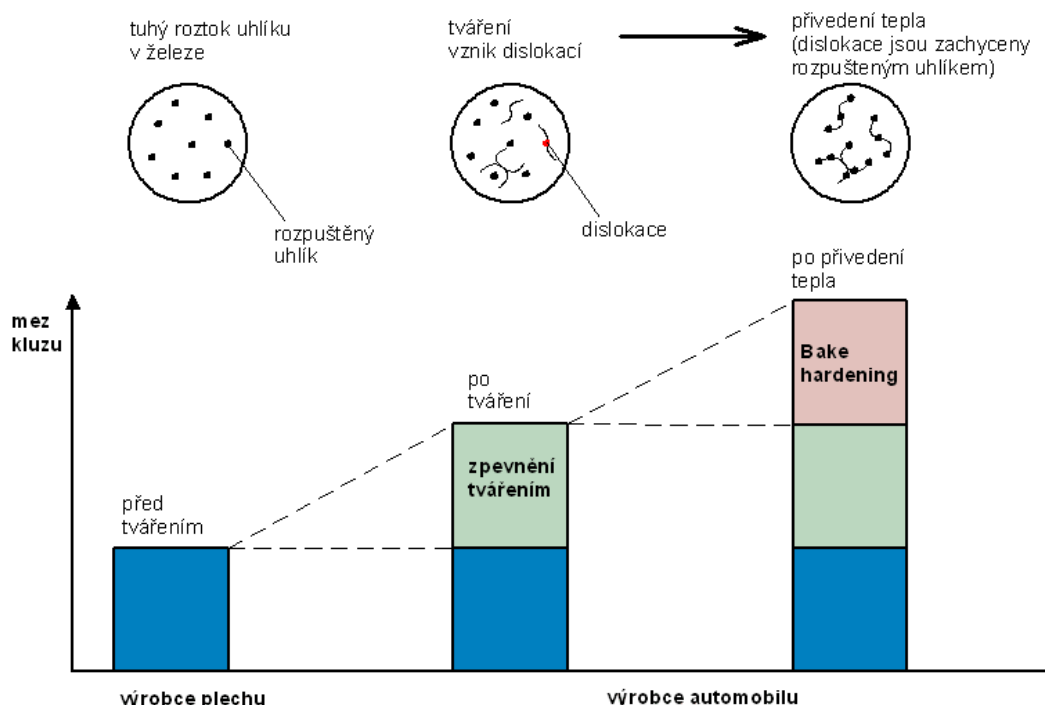
Rozpadem přesyceného tuhého roztoku za vhodných podmínek vzniká nová fáze. Mluvíme o tzv. precipitaci nové fáze z přesyceného roztoku. Precipitáty narušují krystalovou matici a vedou ke vzniku vnitřních sil, zabraňujících pohybu dislokací. Precipitace zvyšuje mez pevnosti a mez kluzu.

2.4.5 Zpevnění pomocí BH efektu [2]

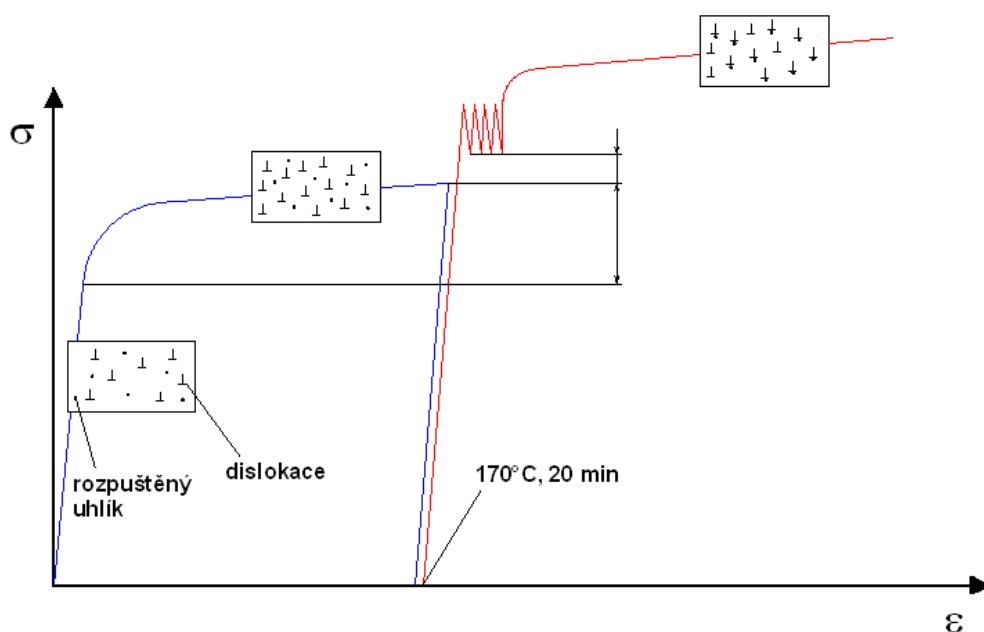
Bake hardening (BH) je speciální metoda zvýšení pevnosti u tenkých plechů.

U hotového vytaženého dílu (výlisek), lze dosáhnout dalšího zpevnění pomocí dodání dostatečného množství tepla. Nejčastěji se tohoto jevu využívá při tepelném ošetření během lakovacího procesu karoserie. Podmínkou pro použití tohoto principu je přítomnost uhlíku ve formě tuhého roztoku i po válcování za tepla. Při tváření plechu dochází k nárůstu počtu dislokací vlivem přetvoření. Následným tepelným zpracováním (170°C po dobu 20 min) umožníme difundovat volné atomy, které blokují dislokace.

Stejného efektu jako s uhlíkem lze docílit i u ocelí s přebytkem titanu a niobu. U tohoto způsobu je dosaženo lepší hlubokotažnosti a BH efekt je výraznější. Nevýhodou je větší energetická náročnost při výrobě.



Obr.č. 10 Bake Hardening proces



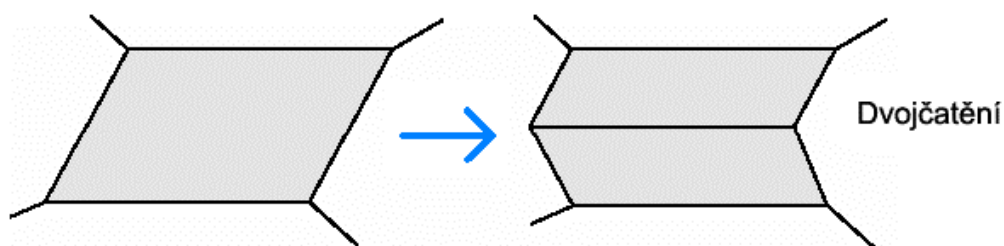
Obr.č. 11 Schematické znázornění vzestupu meze kluzu u BH procesu

2.4.6 Využití TRIP efektu [2]

Využívá se u ocelí se zbytkovým austenitem. Tvárnost vyvolaná transformací (**TR**ansformation - **I**nduced **P**lasticity), kdy se austenit během samostatného procesu tváření přemění na tvrdý martenzit nebo se stabilizuje.

2.4.7 Využití TWIP efektu [2]

Pod TWIP (**T**winning **I**nduced **P**lasticity) efektem se rozumí dvojčatění austenitických zrn během tváření. Na rozdíl od TRIP efektu zde ale nedochází k přeměně na martenzit a to díky jinému chemickému složení.



Obr.č. 12 Dvojčatění austenitického zrna

2.4.8 Zvýšení pevnosti u dvou a vícefázové struktury [2]

Nárůstu pevnosti je dosaženo u extrémně jemné struktury obvykle pomocí kontinuálního žíhání po válcování při mezikritické teplotě. Zatímco dochází k rekrystalizaci zrn, karbidy přítomné na jejich hranicích se rozpouštějí a předávají uhlík kovové matici. Současně se objevuje austenitická fáze. Rychlým ochlazením proudem vody se austenit přemění na tvrdou fázi (martenzit či bainit), která je rovnoměrně rozprostřena ve formě ostrůvků v feritické matici.

2.5 Tváření vysokopevnostních ocelí

U těchto materiálů již ve většině případů nelze používat „klasické“ metody zpracování. Z důvodů velkého odporu vůči přetvoření se používají speciální způsoby na zhotovení polotovaru či konečného výrobku. Nejběžnějším polotovarem z vysokopevnostních ocelí je plech.

Základní dělení tváření je **na tváření za tepla a tváření za studena**. Trendem posledních let je tváření za studena z důvodu úspory energie.

Požadované vlastnosti získáváme tepelně – mechanickým zpracováním.

2.5.1 Tepelně mechanické zpracování [4], [5]

Jde o řízený proces využívající kombinace tváření a tepelného zpracování. Společným účinkem plastické deformace a zpevněním, které je výsledkem fázové přeměny, lze získat oceli o extrémně vysoké pevnosti, konvenčními způsoby tepelného zpracování nedosažitelné.

Tvářením austenitu může dojít k podstatnému zjemnění jeho zrna, tedy i produkty jeho následujících přeměn (martenzit, ferit, perlit) budou jemnější. Dalším důsledkem tváření je zvýšená hustota dislokací, které přecházejí do martenzitu a podílejí se na zvýšení pevnosti.

Mezi nejpoužívanější tepelně mechanické zpracování u plechů s vyšší a vysokou pevností patří řízené válcování a ochlazování.

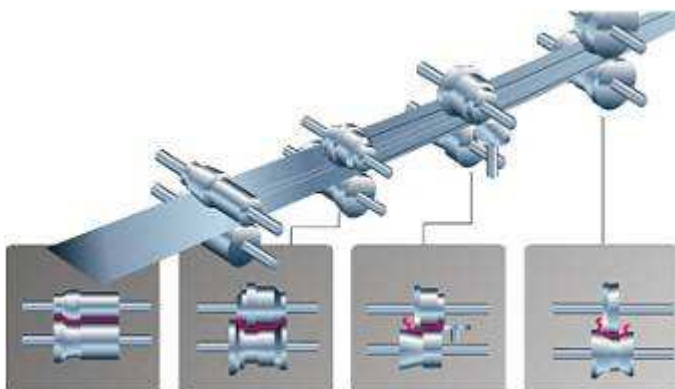
Válcovací i doválcování teplotou a velikostí úběru lze řídit procesy dynamické a statické rekystalizace austenitu. Vhodně zvolenou rychlostí ochlazování austenitu z doválcování teploty lze ovlivnit transformaci jemnozrnného austenitu na jehlicovitý ferit anebo na ferit a perlit s výhodnou kombinací pevnosti a ostatních mechanických vlastností.

2.5.2 Tváření plechů

Plech je základní polotovar pro výrobu výlisků. Na jeho zpracování je kladen velký důraz. Správně navrhnutým zpracováním dosáhneme požadované vlastnosti konstruovaného výrobku. Nejvhodnějšími metodami pro zpracování vysokopevnostní oceli jsou roll-forming, hydro-forming, konvenční lisování či tváření za tepla a pozdější prudké ochlazení.

2.5.2.1 Roll forming [6]

Jedná se válcování za studena za využití tvarových válců ve válcovací stolici. Průchodem je polotovar postupně vytvarován do konečného tvaru. Takto se vyrábí většina dílů z vysokopevnostních plechů.



Obr.č. 13 Ukázka technologie Roll-forming

2.5.2.2 Hydro forming [7]

K tvarování složitých výlisků či profilových trubek je využíván Hydro forming. Jedná se o tvarování působením tlaku tekutiny, která roznese rovnoměrně tvářecí sílu po celé ploše vyráběného dílu.

2.5.2.3 Konvenční lisování

Hlavní využití nachází u výlisků z ocelí s nižšími mechanickými hodnotami a jednodušších tvarů. Lisovací tlak (síla) díky tomu nemusí být tak vysoká, jako by byla v případě dvou a více fázových ocelí.

2.5.2.4 Tváření za tepla [2]

Výrobek je možné tvářením za tepla vyrobit třemi různými způsoby.

- Díl je za tepla vytvarován do požadovaného tvaru, následně je za studena zušlechtěn
- Díl je tvářen na dvě etapy. První je za studena, následuje tváření za tepla a dotvarování do konečné podoby. Konečná fáze je zušlechtění za studena
- Díl je za tepla tvářen do konečné podoby a poté je ochlazen přímo ve stroji

2.6 Použité zkoušky

K zjišťování schopnosti zbytkové plastické deformace, byly vybrány některé základní mechanické zkoušky. Více k jednotlivým zkouškám v praktické části.

2.6.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška je nejrozšířenější statickou zkouškou. Jde o zcela základní a nejběžněji prováděnou zkoušku mechanických vlastností u většiny konstrukčních materiálů (nejen kovových). Výsledky zkoušky tahem do lomu představují tzv. základní mechanické vlastnosti. Zkouška je standardizována, viz např. EN 10002 – 1 „Kovové materiály“.

2.6.2 Zkouška rázem

Slouží k zjištění, kolik práce nebo energie se spotřebuje na porušení zkušební tyče. Zkouší se nejčastěji jedním rázem, kdy na porušení zkušební tyčky se použije najednou dostatečného množství energie.

Nejznámější je zkouška *vrubové houževnatosti* na Charpyho kyvadlovém kladivu.

2.6.3 Zkouška tvrdosti

Tvrdost, jako jedna z mechanických vlastností, má hlavně u kovových materiálů mimořádnou důležitost. Je to proto, že ze všech vlastností materiálu ji můžeme zjistit nejrychleji, nejlevněji a i na předmětech menších rozměrů. Z tvrdosti často usuzujeme i na některé další vlastnosti materiálu (pevnost v tahu, obrobitelnost atd.). Zkouší se buď na zkušebních vzorcích, nebo přímo na hotových výrobcích.

V praktické části využijí zjišťování tvrdosti **podle Vickerse**.

2.6.4 Zkouška ohybem [2]

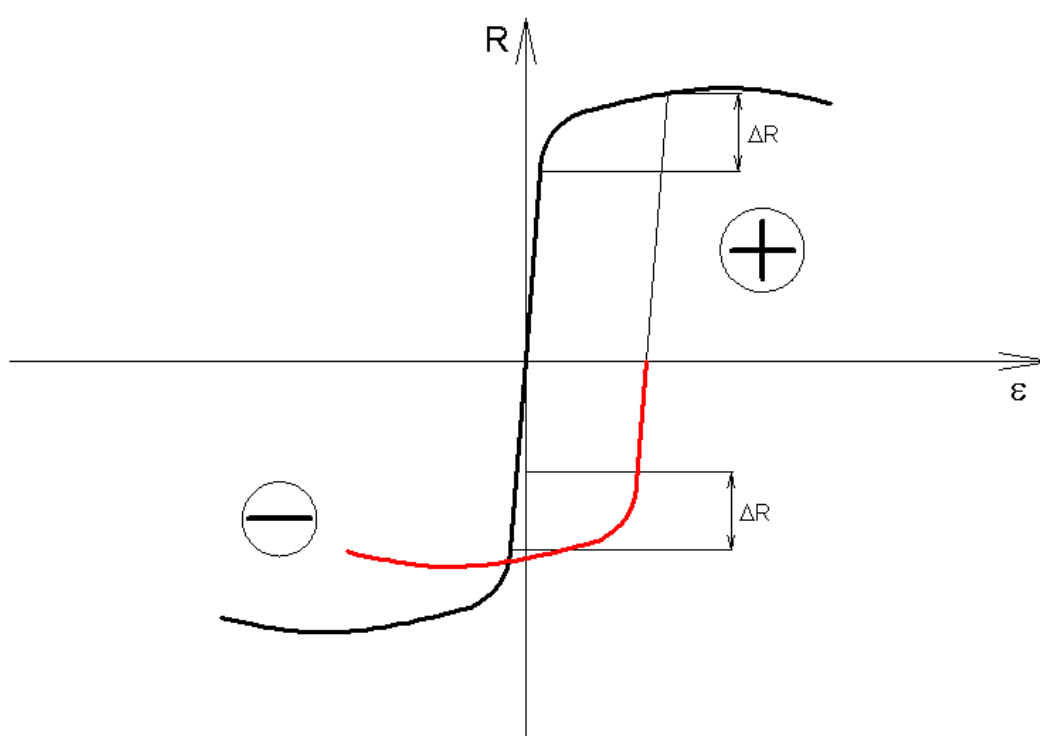
Tato zkouška se používá u materiálů křehkých hlavně u litých materiálů. U materiálů houževnatých k porušení zkušební tyče nedojde. Zkoušku využijí pro realizování Bauschingerova efektu.

Bauschingerův efekt vzniká, jestliže materiál při tváření vystavíme změně smyslu působícího napětí. Při této změně nám klesne mez kluzu.

2.6.4.1 Důvod změny hodnoty meze kluzu [2]

V materiálu plastická deformace nikdy neprobíhá v celém objemu najednou, zrna která se plasticky deformují vyvolávají v okolních zrnech pružnou deformaci, ale opačného smyslu (tzv. „reakční moment“). V okamžiku, kdy změníme smysl namáhání nám tento moment „pomáhá“ k plastické deformaci. Výsledkem je snížení meze kluzu při změně smyslu namáhání.

Předpoklad: Pro dva odlišné vzorky je křivka zpevnění v tlaku a tahu stejná.



Obr.č. 14 Bauschingerův efekt – změna meze kluzu

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Úvod

Tématem diplomové práce bylo zvolení vhodné metodiky, díky které by bylo možné určit schopnost zbytkové plastické deformace u výlisku z pevnostního plechu. Tato veličina úzce souvisí s již vyčerpanou plasticitou při samotné výrobě výlisku. Součet těchto dvou hodnot nám dává celkovou schopnost plastické deformace materiálu (do chvíle porušení celistvosti materiálu).

K tomuto účelu byly vybrány 3 metody zkoušek. Vhodnost použití jednotlivých typů zkoušek pro zjištění zbytkové deformace byla ověřována na laboratorních vzorcích. Na základě získaných výsledků z těchto zkoušek rozhodneme o vhodnosti dané metodiky k určení schopnosti zbytkové plastické deformace u daného výlisku. Jednalo se o zkoušku v tahu, zkoušku tvrdosti, rázovou zkoušku a zkoušku v ohybu. Všechny tyto metody byly provedeny na třech druzích vysokopevnostních vícefázových ocelí.

Zkoušené materiály:

- **RA-K 40/70** označení dle *Thyssen – Krup Stahl*
- **CP-W 800** označení dle *Thyssen – Krup Stahl*
- **MS-W 1200** označení dle *Thyssen – Krup Stahl*

Vycházelo se z předpokladu, že výlisek při výrobě vlivem deformace mění své mechanické vlastnosti. Zvolenými metodami zkoušení by změna mechanických vlastností měla být průkazná. Cílem měření diplomové práce je tedy nalézt závislost měřených mechanických veličin (tvrdost, rázové práce a meze kluzu) na deformaci.

Zkouška tahem byla využita na zjištění základních mechanických hodnot u tří výše zmíněných materiálů. Nejvíce nás zajímala potřebná deformace k porušení oceli, ze které se dále vycházelo při simulování různých hodnot deformace. Pro naměření potřebných závislostí mechanických ukazatelů (rázová práce, tvrdost ..) je třeba získat vzorky o různé hodnotě deformace. Hodnota maximální možné deformace pro jednotlivé materiály se rozdělila na 3 - 5 intervalů dle materiálu. Takto deformované vzorky se dále využily ke zkoušce tvrdosti a rázové zkoušce.

Z tohoto vyplývá, že zkouška tahem byla jen pomocná zkouška a byla využita pouze k simulování různých stupňů deformace.

Zkouška tvrdosti a zkouška rázem vycházela z předpokladu, že dochází vlivem deformace ke změně mechanických hodnot. Cílem těchto zkoušek bylo zhotovení kalibračních křivek závislosti tvrdost – deformace, a rázová energie – deformace. Díky těmto závislostem lze následně z měření tvrdosti či rázové práce naměřených u již deformovaného materiálu (výlisku) rozhodnout o mezi vyčerpané plasticity. U zkoušky tvrdosti by mělo platit, že s rostoucí deformací poroste i tvrdost důsledkem změny měkkých fází na tvrdší. Vlivem rostoucí tvrdosti, by měla zároveň růst i křehkost měřeného materiálu, což by se mělo projevit poklesem hodnoty rázové práce nutné na přeražení zkušební vzorku.

Zkouška ohybem využívala jevu zvaného Baushingerův efekt. Tento efekt lze dokázat tak, že jestliže ohneme materiál na určitý uhel (hloubku), obrátíme jej a ohybem vrátíme do původní podoby, klesne nám při následném zatížení mez kluzu. Cílem bylo zhotovení kalibrační křivky závislosti meze kluzu – hloubka ohybu.

3.2 Zkouška tahem

Tahová zkouška je nejfrekventovanější mechanickou zkouškou kovových materiálů. Jedná se o základní zkoušku, která nám dává bližší informace o zkoumaném materiálu, lze vyhodnotit ukazatele tvárnosti, tj. tažnost – A , mez kluzu $R_{P0,2}$, mez pevnosti – R_m , kontrakci – Z .

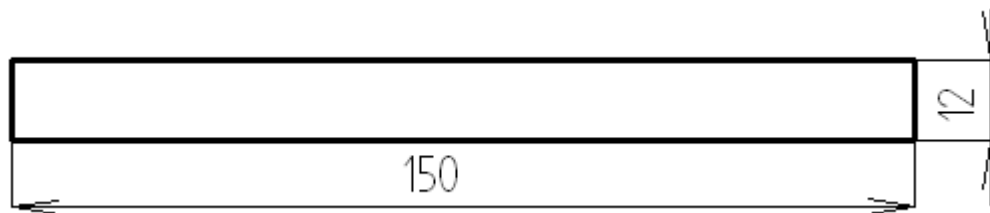
Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením, obvykle do přetržení pro stanovení jedné nebo více napěťových a deformačních charakteristik zavedených v normě. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10°C do 35°C, pokud není stanoveno jinak, rychlost zatěžování závisí na mechanických hodnotách zkoušeného materiálu.

3.2.1 Zkušební vzorky:

Tvar a rozměry zkušebních tyčí závisí na tvaru a rozměrech kovových výrobků, pro které jsou určovány mechanické vlastnosti. Zkušební tyč je obvykle připravena obráběním vzorku odebraného z výrobku. Příčný průřez

zkušebních těles může být čtvercový, kruhový, obdélníkový, prstencový nebo jiného tvaru.

V našem případě se vyrobily nenormalizované zkušební vzorky. Důvodem je problém získat tento pevnostní materiál. V našem případě byl dodán v kruhových přístřizích průměru 210 mm. Z těchto polotovarů bylo možné vyrobít pouze 1-2 normalizované vzorky. Vzhledem k ceně se to nedělalo.



Obr.č. 15 Rozměry zkušebního vzorku pro tahovou zkoušku

3.2.1.1 Příprava vzorků:

Vzorky pro zjištění závislostí (tvrdosti, rázové práce či hloubky ohybu na deformaci) byly odebrány ve směru válcování (0°). Tento směr byl volen z toho důvodu, že na výlisku nelze jinak vzorek odebrat. Rozměry výztuhy jiný směr nedovolovaly.

Vzorky pro laboratorní zkoušky pocházely z jedné tabule, což zaručuje stejné vlastnosti. Stříhány byly na tabulových nůžkách s přídavkem na obrábění a broušení. Hromadným broušením bylo minimalizováno riziko vzniku trhlin na hranách vzorků a zaručovalo stejný rozměr.

3.2.2 Zkušební zařízení:

- Zkušební stroj musí být ověřen v soulase s EN 10002-2 a být třídy 1 nebo vyšší. V našem případě se jednalo o zařízení TIRATEST 2300 s mechanickými kleštinami. Trhací zařízení bylo řízeno softwarem LabTest v.3.
- Průtahoměr musí být třídy 1 (ISO/DIS 9513) pro stanovení horní a dolní meze kluzu a pro smluvní meze kluzu; pro ostatní charakteristiky může být použit průtahoměr třídy 2 (ISO/DIS 9513).
- Rychlost zkušebního stroje musí vyhovovat požadavkům závislejícím na materiálu. V ČSN EN 10002-1 jsou blíže specifikovány rychlosti

přírůstku napětí, resp. deformace, které je třeba dodržet při určování jednotlivých napěťových charakteristik.

- Během zkoušky je zaznamenávána závislost zatížení [N] - prodloužení [mm] nebo závislost napětí [MPa] - prodloužení [%].



Obr.č. 16 Trhací zařízení TIRAtest 2300

Základní mechanické hodnoty zjištěné zkouškou v tahu:

- mez pevnosti v tahu R_m ,
- mez kluzu $R_{p0,2}$,
- tažnost A_{50} ,
- smluvní diagram napětí – deformace.

Problémy při samotné zkoušce tahem:

- ❖ U vysokopevnostních ocelí CP-W a RAK byla povrchová vrstva (pozinkovaný plech), která způsobovala klouzaní vzorků z čelistí.
- ❖ U vysokopevnostní oceli MS-W vyklouzávání z čelistí způsobovala velká tvrdost oceli.

Odstranění klouzání vzorků z čelistí:

- ❖ Bylo nutné zvýšit přitlačnou sílu čelistí – toto se realizovalo zvětšením páky působící na zavírání čelistí.
- ❖ Zvětšením délky vzorků, z důvodu lepšího uchopení čelistmi. Po deformování vzorků jej bylo nutno zkrátit na délku 80 mm. Důvodem

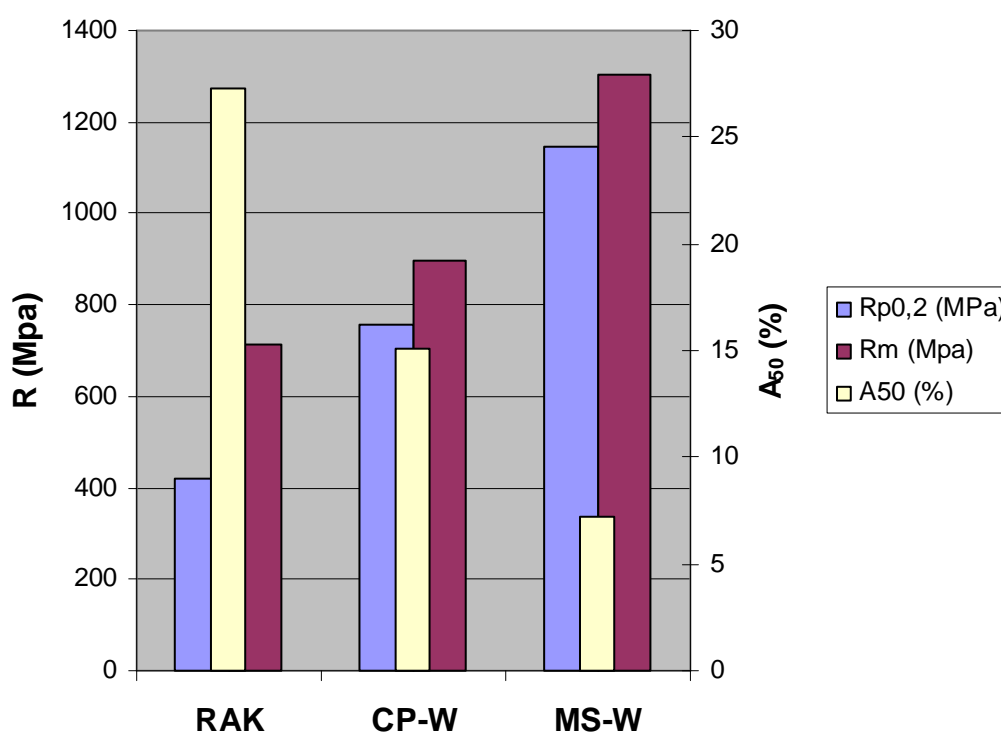
zkrácení jsou maximální možné rozměry zkoušeného vzorku u rázové zkoušky.

3.2.3 Mechanické hodnoty

Zjištěné mechanické hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce č.1, protokoly ze zkoušky tahem jsou uvedeny v příloze 1.

Tab. č. 1 Základní mechanické hodnoty u zkoumaných materiálů

Materiál	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A ₅₀ (%)	t (mm)
RAK	417	713	27,3	1,40
CP-W	757	898	15,1	2,00
MS-W	1144	1305	7,2	1,80



Graf č. 1 Porovnání mechanických hodnot u zkoumaných materiálů

3.2.4 Deformace jednotlivých materiálů:

Při deformaci jednotlivých materiálů se vycházelo ze zjištěné tažnosti A_{50} . Deformace zjištěná pomocí průtahoměru, ale neodpovídá plastické deformaci. Deformace oceli je složena s plastické a pružné deformace. Vzorky byly orýsovány z důvodu zjištění skutečné plastické deformace. U MS-W oceli se volili 3 řady. U zbývajících dvou byly zhotoveny vzorky na 5 řad. Jedna série byla vždy za mezí pevnosti (největší plastická deformace). V rámci jedné řady bylo zkoušeno 7 vzorků.

Tab. č. 2 Skutečná plastické deformace na jednotlivých vzorcích

Řada číslo	MS-W (%)	RAK (%)	CP-W (%)
0.	0	0	0
1.	1,2	6	2
2.	2,2	12	4
3.	3,2	18	6
4.	-	22	8
5.	-	25	12

Poznámka: Oranžová výplň značí deformaci za mezí pevnosti materiálu.

3.3 Zkouška tvrdosti:

Tvrdot je jedna z nejčastěji měřených charakteristik u materiálu. Je definována jako odolnost materiálu proti vníkaní indentoru. Existuje řada systémů měření tvrdosti, v dalším výkladu se zaměříme pouze na metodu používanou v diplomové práci.

3.3.1 Tvrdot podle Vickerse

Diamantové vníkácí těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou s vrcholovým úhlem 136° mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu vzorku. Po odlehčení jsou měřeny úhlopříčky vtisku ve zkoušeném materiálu. Mírou tvrdosti je střední délka úhlopříčky.

Zkušební zatěžující síla bývá od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s. Použité zatížení píšeme do označení, např. HV 100 .

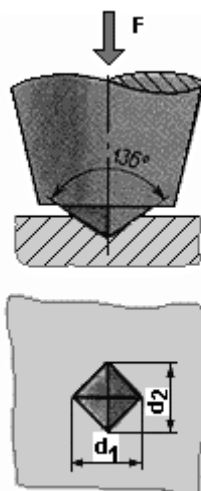
Pro běžně zkušební zatížení 300 N a dobu od 10 do 15 s se používá označení HV.

Pro praktickou potřebu používáme tabulek, kde podle délky úhlopříčky d a použité síly F je uvedena odpovídající tvrdost.

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

F je zkušební síla [N]

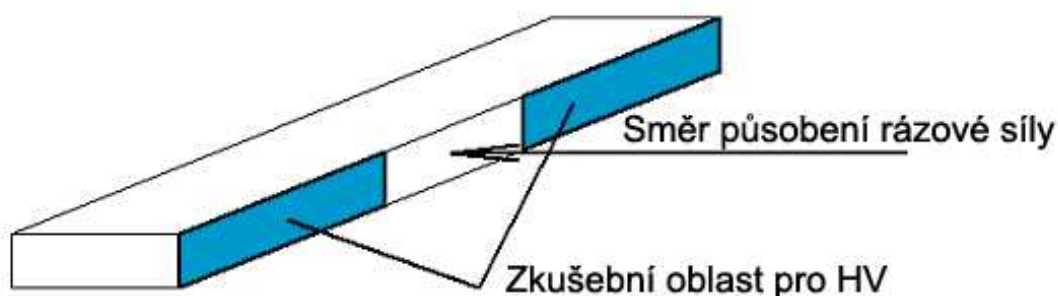
d je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2 [mm]



Obr.č. 17 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

3.3.2 Příprava vzorků

Vzorky byly nejdříve podrobeny zkoušce tvrdosti. Jednalo se o nedoformované a deformované vzorky, které byly převzaty ze zkoušky tahem. Tvrdost nemohla být měřena na vnější ploše z důvodu pozinkování, které znemožňovalo správné odečítání tvrdosti. Proto byla vybrána oblast, která neovlivní následující zkoušku rázem a zároveň umožňuje dobré odečítání tvrdosti z důvodu kovově čistého povrchu (viz obr. 18)



Obr.č. 18 Ukázka míst zkoušení tvrdosti dle Vickerse

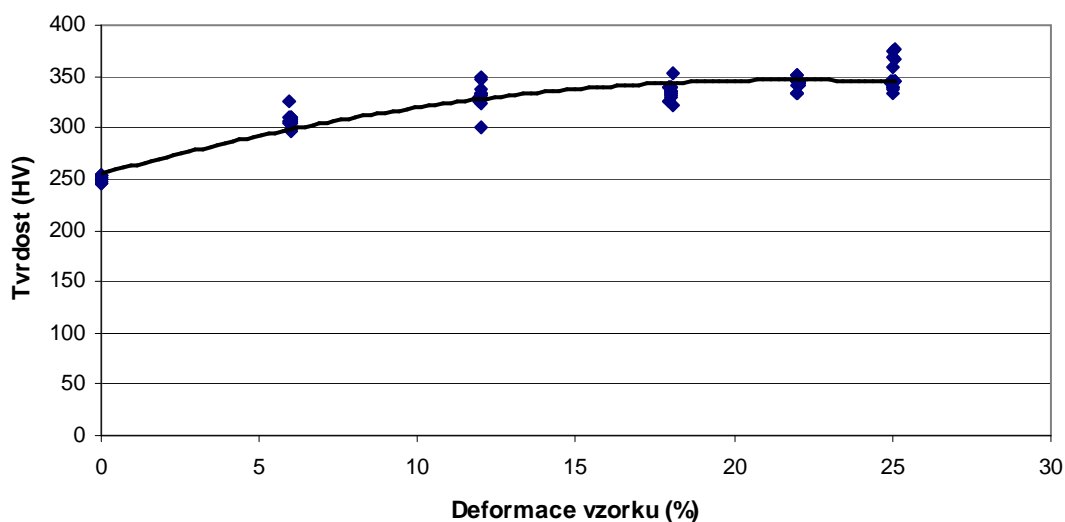
3.3.3 Zkoumané materiály, výsledky zkoušek

U každého vzorku byla měřena tvrdost dvakrát. Z důvodu přehlednosti byla vypočtena u každé řady střední hodnota plastická deformace ta byla následně zaokrouhlena na 1 desetinné místo. Tvrdost byla vztažena na zatížení, které odpovídá tvrdosti HV20

3.3.3.1 RAK ocel

Tab. č. 3 Hodnoty tvrdosti HV20 u RAK oceli

Vzorek	Deformace (%)	Tvrdost	
		1 (HV)	2 (HV)
0-1	0	254	250
0-2		249	246
0-3		249	253
0-4		248	245
0-5		254	251
0-6		251	253
0-7		249	248
1-1	6	326	305
1-2		306	304
1-3		310	297
1-4		310	306
1-5		304	298
1-6		308	310
1-7		306	308
2-1	12	301	349
2-2		330	325
2-3		332	334
2-4		347	334
2-5		324	328
2-6		338	328
2-7		332	328
3-1	18	353	321
3-2		334	330
3-3		326	340
3-4		336	332
3-5		334	340
3-6		340	326
3-7		336	340
4-1	22	343	345
4-2		341	345
4-3		343	345
4-4		334	334
4-5		345	351
4-6		341	334
4-7		351	345
5-1	25	376	367
5-2		345	359
5-3		340	334
5-4		343	345
5-5		345	345
5-6		340	338
5-7		368	374



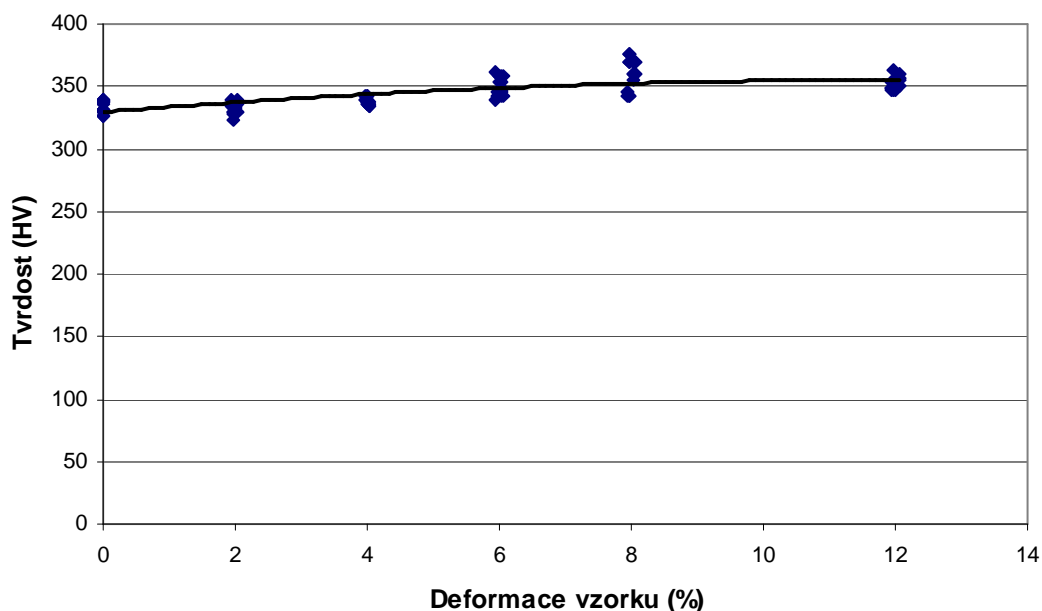
Graf č. 2 Závislost tvrdosti na deformaci vzorku z RAK oceli

U této oceli je vidět pozvolný nárůst tvrdosti, který odpovídá předpokladu, že RAK ocel má velký koeficient zpevnění. U tohoto materiálu by se zkouška tvrdostí dala využívat, ale pouze jako informativní. Důvodem je, že do cca 18% deformace je sklon křivky poměrně strmý a tato oblast by se dala využít. Zbytek závislosti je příliš plochý na určování deformace z tvrdosti vzorku.

3.3.3.2 CP-W ocel

Tab. č. 4 Hodnoty tvrdosti HV20 u CP-W oceli

Vzorek	Deformace (%)	Tvrdost	
		1 (HV)	2 (HV)
0-1	0	336	332
0-2		332	338
0-3		340	330
0-4		326	338
0-5		340	332
0-6		326	338
0-7		340	332
1-1	2	323	330
1-2		336	333
1-3		336	330
1-4		328	330
1-5		340	335
1-6		330	335
1-7		340	330
2-1	4	338	334
2-2		336	334
2-3		343	340
2-4		338	338
2-5		343	336
2-6		338	336
2-7		343	340
3-1	6	347	345
3-2		340	362
3-3		358	343
3-4		343	358
3-5		353	349
3-6		343	345
3-7		358	354
4-1	8	360	360
4-2		369	355
4-3		343	343
4-4		376	369
4-5		343	345
4-6		376	369
4-7		369	360
5-1	12	355	353
5-2		351	357
5-3		347	349
5-4		347	364
5-5		355	360
5-6		347	349
5-7		349	354



Graf č. 3 Závislost tvrdosti na deformaci vzorku z CP-W oceli

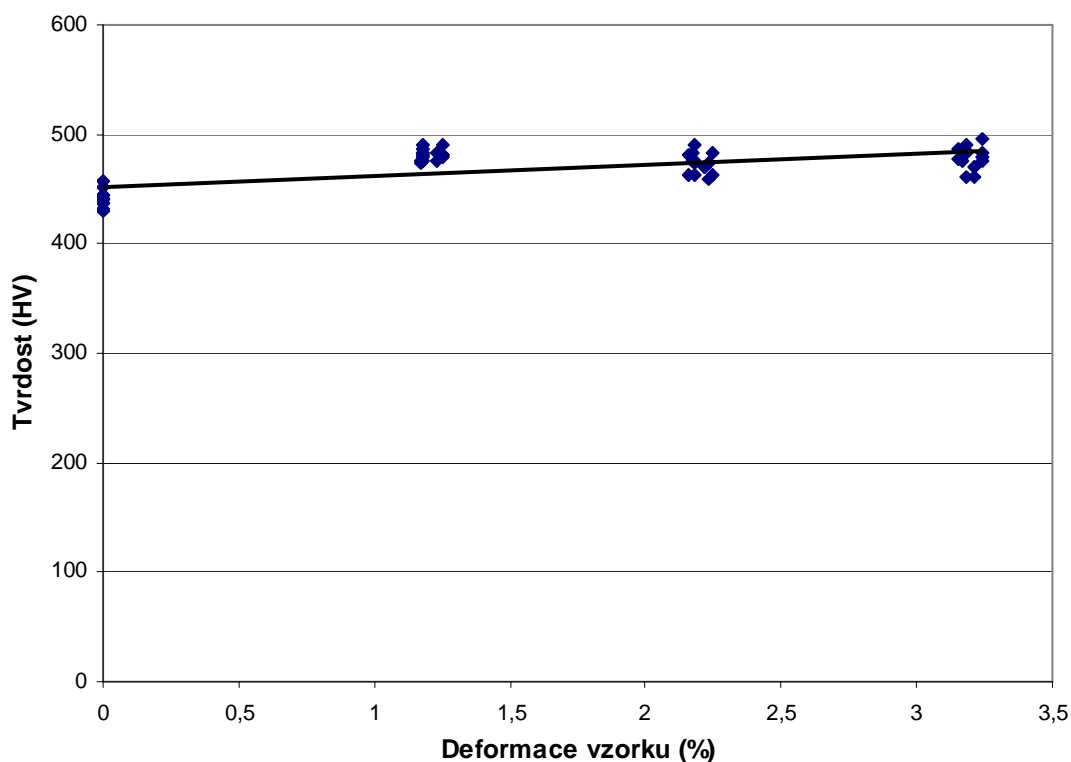
Nárůst tvrdosti do meze pevnosti je malý z tohoto důvodu je zkouška neprůkazná a pro tento materiál nevyhovující. Průběh celého grafu je plochý a určování deformace by bylo zatíženo velkou chybou.

3.3.3.3 MS-W ocel

Tab. č. 5 Hodnoty tvrdosti HV20 u MS-W oceli

Vzorek	Deformace (%)	Tvrdost	
		1 (HV)	2 (HV)
0-1	0	441	457
0-2		429	438
0-3		440	441
0-4		432	445
0-5		438	451
0-6		441	445
0-7		440	438
1-1	1,2	486	483
1-2		480	490
1-3		476	473
1-4		476	480
1-5		476	483
1-6		482	482
1-7		490	482

Vzorek	Deformace (%)	Tvrdost	
		1 (HV)	2 (HV)
2-1	2,2	470	470
2-2		476	490
2-3		483	476
2-4		473	460
2-5		463	483
2-6		473	462
2-7		462	482
3-1	3,2	483	470
3-2		486	457
3-3		496	463
3-4		470	441
3-5		483	457
3-6		485	441
3-7		476	457



Graf č. 4 Závislost tvrdosti na deformaci vzorku z MS-W oceli

Materiál je z velké části tvořen martenzitem, u této fáze se tvrdost téměř nemění, proto tato zkouška není vhodná k zjištění hledané hodnoty schopnosti zbytkové plastické deformace. Průběh tvrdosti v závislosti na deformaci je téměř konstantní a proto nevyhovující.

3.3.4 Vyhodnocení měření

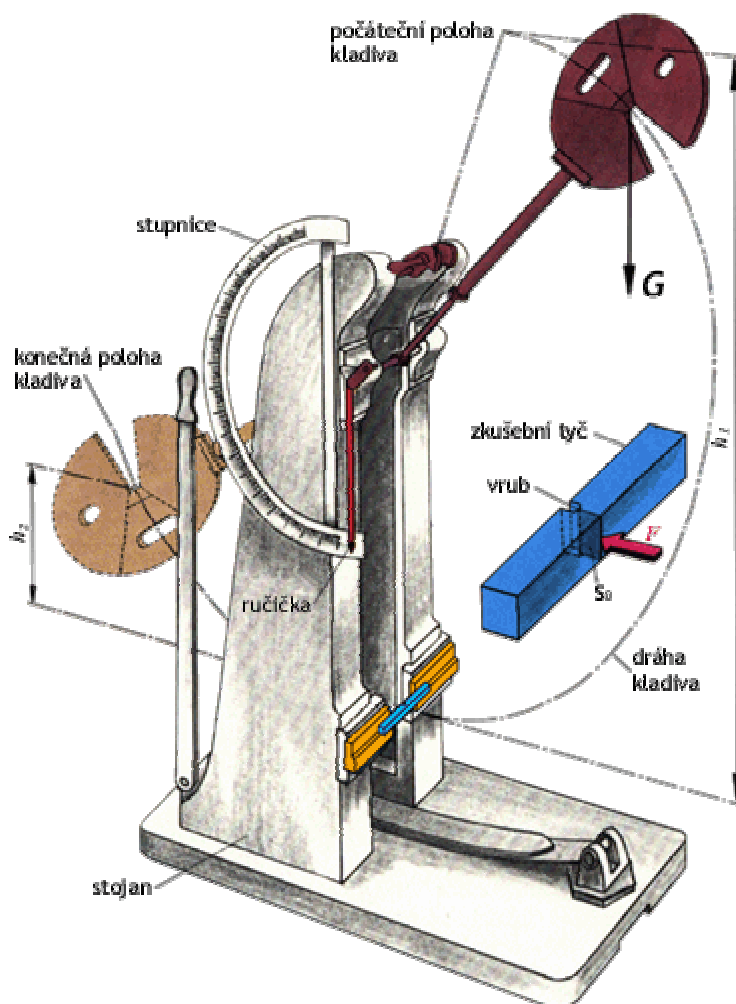
Zkouška tvrdosti dokazuje, že vlivem deformace roste tvrdost měřeného materiálu. Měření tvrdosti by našlo využití u méně pevných materiálů s velkým koeficientem zpevnění. U našich materiálů byla průkazná pouze u RAK oceli, která tyto předpoklady splňuje. U vysokopevnostních materiálů lze zkoušku tvrdosti použít pouze v omezené míře.

Dalším poznatkem je, že s rostoucí hodnotou meze pevnosti se stává průběh plošším a naměřené hodnoty tvrdosti pro různě deformace mají menší rozdíly.

3.4 Zkouška rázem

Představitelem rázové zkoušky je Charpyho kladivo (pro oceli a plasty). Tato zkouška patří mezi rázové zkoušky, časový interval působení síly je kratší než jedna třetina minimální periody vlastních kmitů systému. V případě delších časových intervalů zatěžování hovoříme o zatěžování statickém, resp. Kvazistatickém.

Zkušebních těles s vrubem (do tvaru U nebo V) o určité geometrii, se používá k hodnocení křehkosti, případně houževnatosti. Zkoušky jsou vhodné pro srovnání lomového chování jednotlivých materiálů. V našem případě porovnání zdeformovaného vzorku odebraného z místa ohybu ve směru válcování a nezdeformovaného materiálu odebraného z téhož výlisku.



Obr.č. 19 Zkouška rázem v ohybu - Charpyho kyvadlové kladivo

Podstatou zkoušky je umístění zkušebního tělesa do přípravku, které je přeraženo břitem umístěným na beranu kyvadlového kladiva spouštěného z definované výšky. Při zkoušce se určuje tzv. nárazová práce, tj. energie

spotřebovaná (absorbovaná) na přeražení zkušebního tělesa. Hodnota nárazové práce je dána výškou, do které vykývne beran kladiva po zkoušce.

3.4.1 Příprava vzorků pro rázovou zkoušku:

1. Nastříhání polotovarů z plechu na rozměry 150x12 mm
2. Přebroušení vzorků na hranicích stříhání, z důvodu snížení rizika vzniku trhliny
3. Deformování vzorků na trhacím stroji dle předpisu (viz. 3.2.3. – tab.č.2)
4. Zkrácení vzorků na délku 80 mm
5. Hromadné frézování vzorků na rozměr 80x10,5 mm
6. Hromadné broušení vzorků na konečný rozměr 80x10 mm, tloušťka dle druhu materiálu

Problémy při zkoušce na Charpyho kladivu:

- Z důvodu velké štíhlosti vzorků (např. u CP-W oceli: 1,5x10-80) se při deformaci kladivem vzorek zkroutil a znemožnil provedení zkoušky
- Materiál z RAK oceli měl velkou zásobu plasticity, díky které se pouze zdeformoval. Zkouška musela být prohlášena neplatnou.

Problémy odstraněny:

- Bylo nutno vyrobit nový svěrák. Stávající přípravek nebyl vhodný k testování zkoušených plechů. Nový přípravek musel být navrhnut s ohledem na zkoušený tvar vzorku, následně vyroben. Vyrobený přípravek dosáhl zlepšení kontroly deformace vzorku viz obrázek č. 15. Okótovaná skica přiložena v příloze
- U vzorků z materiálu RAK, byl vyroben V vrub do hloubky 0,2 mm. Tato úprava zaručila správnost provedení zkoušky. U ostatních materiálů vrub nebyl zhotoven z důvodu velké křehkosti oceli.



Obr.č. 20 Přípravek na zkoušku rázem

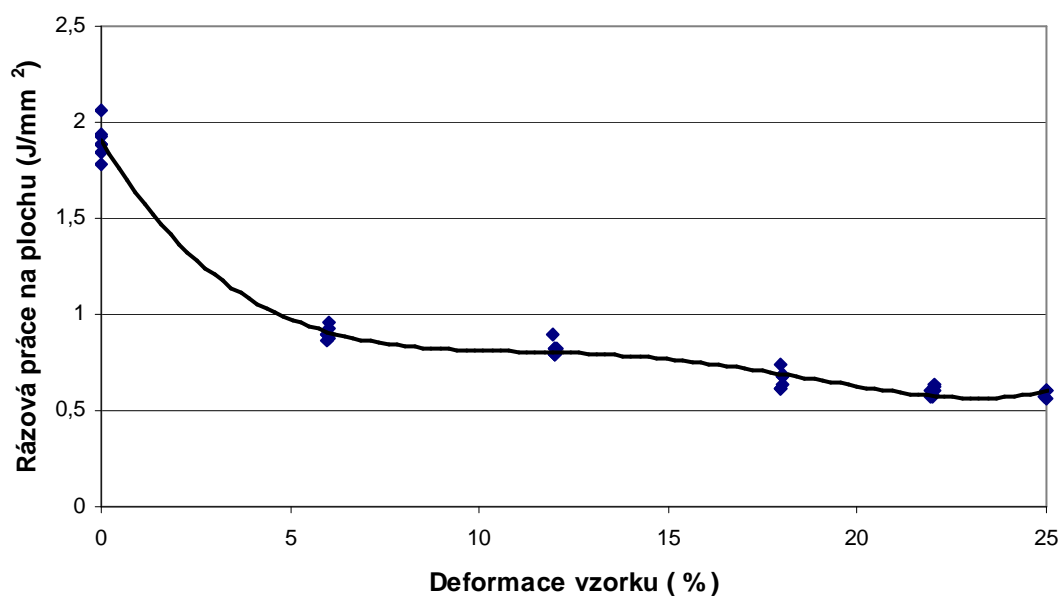
3.4.2 Zkoumané materiály, výsledky zkoušek

Naměřené hodnoty byly zařazeny do kapitol dle jednotlivých materiálů. Z důvodu přehlednosti byla vypočtena u každé řady střední hodnota plastická deformace ta byla následně zaokrouhlena na 1 desetinné místo. Pro lepší porovnatelnost rázové práce nutné na přeražení zkoumaných tří materiálů byla přepočtena na plochu.

3.4.2.1 RAK ocel

Tab. č. 6 Naměřené hodnoty rázové práce u RAK oceli

Číslo vzorku	Deformace (%)	Energie na plochu (J/mm ²)	Číslo vzorku	Deformace (%)	Energie na plochu (J/mm ²)
0-1	0	1,937	3-1	18	0,687
0-2		1,841	3-2		0,673
0-3		2,060	3-3		0,739
0-4		1,786	3-4		0,632
0-5		1,889	3-5		0,618
0-6		1,923	3-6		0,618
0-7		1,889	3-7		0,673
1-1	6	0,893	4-1	22	0,632
1-2		0,893	4-2		0,604
1-3		0,893	4-3		0,625
1-4		0,865	4-4		0,577
1-5		0,962	4-5		0,570
1-6		0,927	4-6		0,584
1-7		0,879	4-7		0,604
2-1	12	0,824	5-1	25	0,639
2-2		0,893	5-2		0,599
2-3		0,790	5-3		0,604
2-4		0,790	5-4		0,570
2-5		0,824	5-5		0,563
2-6		0,790	5-6		0,563
2-7		0,824	5-7		0,604



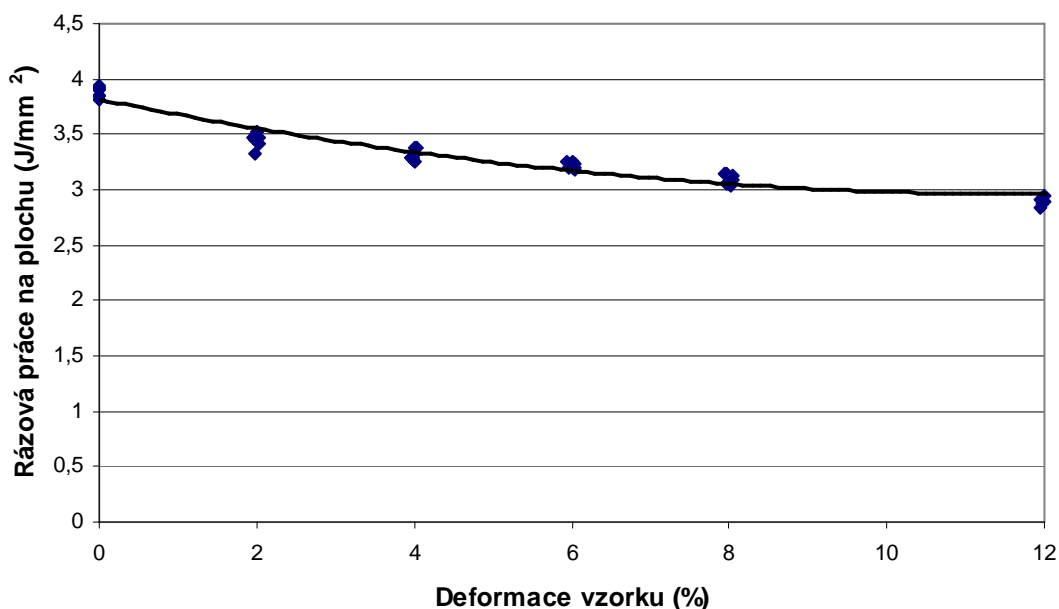
Graf č. 5 Závislost deformace vzorku z RAK oceli na spotřebované energii

U průběhu grafu. č.5 je dobře vidět výrazné poklesnutí rázové energie již při první deformaci cca 6%. Hodnota klesla téměř na polovinu počáteční energie.

3.4.2.2 CP-W ocel

Tab. č. 7 Naměřené hodnoty rázové práce u RAK oceli

Číslo vzorku	Deformace (%)	Energie na plochu (J/mm ²)	Číslo vzorku	Deformace (%)	Energie na plochu (J/mm ²)
0-1	0	3,914	3-1	6	3,181
0-2		3,819	3-2		3,257
0-3		3,943	3-3		3,238
0-4		3,857	3-4		3,190
0-5		3,895	3-5		3,200
0-6		3,857	3-6		3,190
0-7		3,905	3-7		3,248
1-1	2	3,333	4-1	8	3,038
1-2		3,533	4-2		3,119
1-3		3,410	4-3		3,152
1-4		3,481	4-4		3,057
1-5		3,467	4-5		3,143
1-6		3,452	4-6		3,071
1-7		3,476	4-7		3,095
2-1	4	3,371	5-1	12	2,886
2-2		3,381	5-2		3,019
2-3		3,286	5-3		2,833
2-4		3,276	5-4		2,867
2-5		3,257	5-5		3,057
2-6		3,333	5-6		2,952
2-7		3,286	5-7		2,905



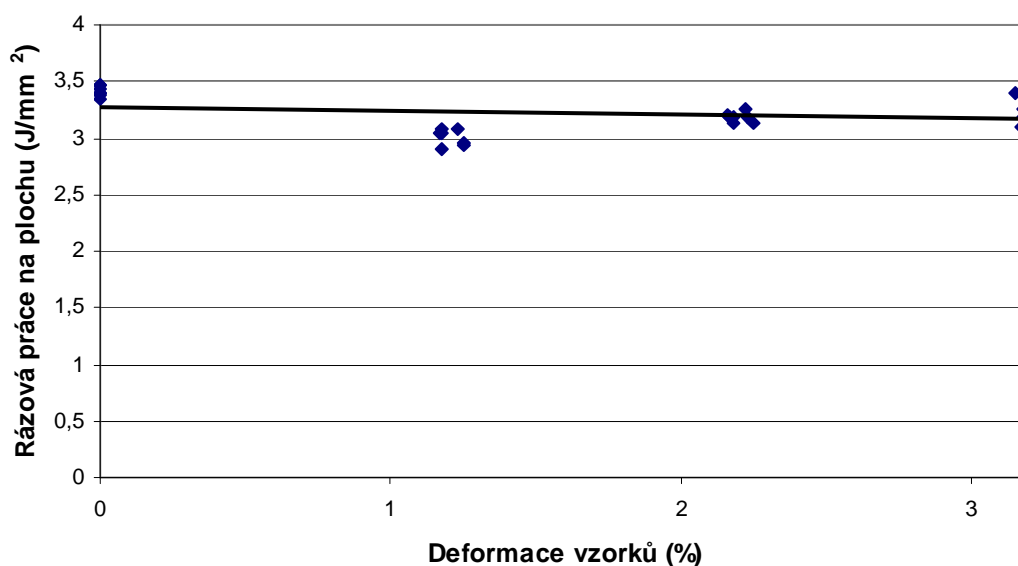
Graf č. 6 Závislost deformace vzorku z CP-W oceli na spotřebované energii

Průběh grafu č.6. naplňuje předpoklady, že s rostoucí deformací vzorku, klesá rázová práce z důvodu snižující se houževnatosti a rostoucí křehkosti materiálu vlivem deformačního zpevňování.

3.4.2.3 MS-W ocel

Tab. č. 8 Naměřené hodnoty rázové práce u MS-W oceli

Číslo vzorku	Deformace (%)	Energie na plochu (J/mm ²)	Číslo vzorku	Deformace (%)	Energie na plochu (J/mm ²)
0-1	0	3,372	2-1	2,2	3,250
0-2		3,462	2-2		3,127
0-3		3,350	2-3		3,194
0-4		3,406	2-4		3,194
0-5		3,462	2-5		3,127
0-6		3,406	2-6		3,183
0-7		3,434	2-7		3,210
1-1	1,2	2,903	3-1	3,2	3,250
1-2		2,931	3-2		3,406
1-3		3,043	3-3		3,155
1-4		3,071	3-4		3,434
1-5		3,071	3-5		3,099
1-6		2,959	3-6		3,183
1-7		3,043	3-7		3,350



Graf č. 7 Závislost deformace vzorku z MS-W oceli na spotřebované energii

U MS-W oceli nemá význam zjišťování tvrdosti. Materiál je tvořen z velké části martenzitem u kterého se tvrdost vlivem deformace téměř nemění.

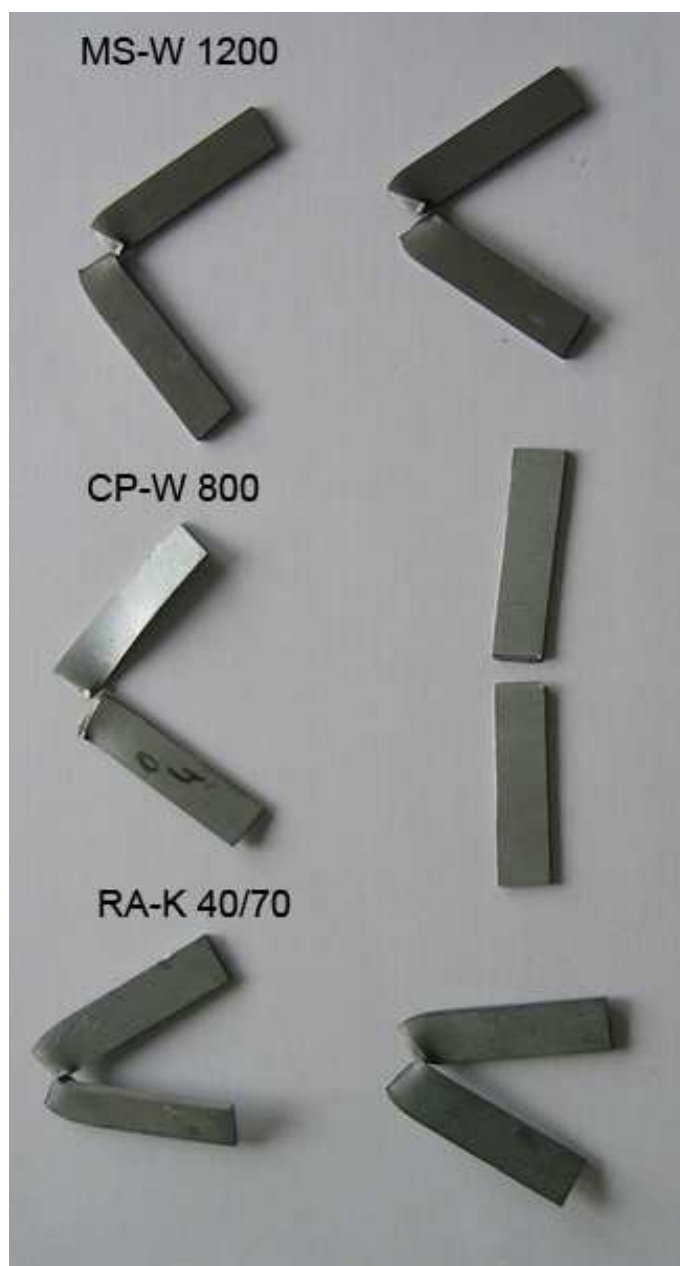
3.4.3 Vyhodnocení měření

Z naměřených hodnot je jasné vidět, jak velký význam na hodnotu nárazové práce má vrub. Díky tomu u RAK oceli vyšla spotřebovaná energie cca 3x menší než u zbývajících materiálů. U všech zkoumaných materiálů je vidět změna mezi nedeformovaným a deformovaným materiálem. Tento jev lze vysvětlit u vícefázových ocelí přeměnou měkkých-houževnatých fází (ferit)

na tvrdé-křehké fáze (např. u TRIP ocelí na martenzit). Tento jev byl značně omezen u MS-W oceli.

Rázová zkouška stejně jako zkouška tvrdosti by se dala dobře využívat u méně pevných materiálů s velkým koeficientem zpevnění. Pro vysokopevnostní materiály jako jsou MS-W oceli je zkouška neprůkazná.

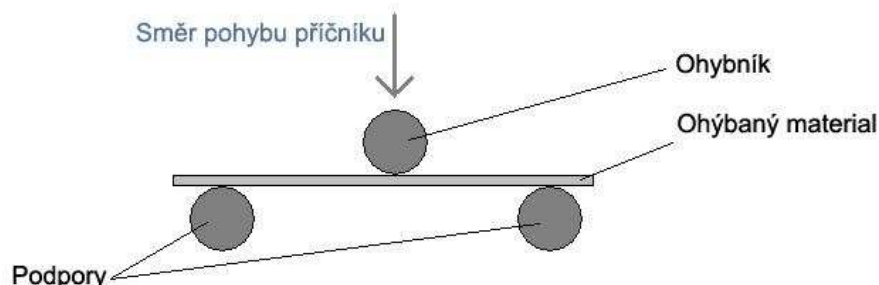
Na obr. č. 21 je vidět jaký význam měla deformace na tvar lomu. Vlevo je vždy nedeformovaný vzorek a vpravo vzorek s nejvyšší deformací (tj. za mezí pevnosti). Největší rozdíl je u CP-W oceli, u které je vidět značné zvýšení křehkosti materiálu.



Obr.č. 21 Ukázka přeražených vzorků z rázové zkoušky

3.5 Zkouška ohybem:

K realizaci zkoušky ohybem bylo použito zařízení TIRATEST 2300 s přípravkem na provedení ohybu dle obrázku č. 18. Trhací zařízení bylo řízeno softwarem LabTest v.3.



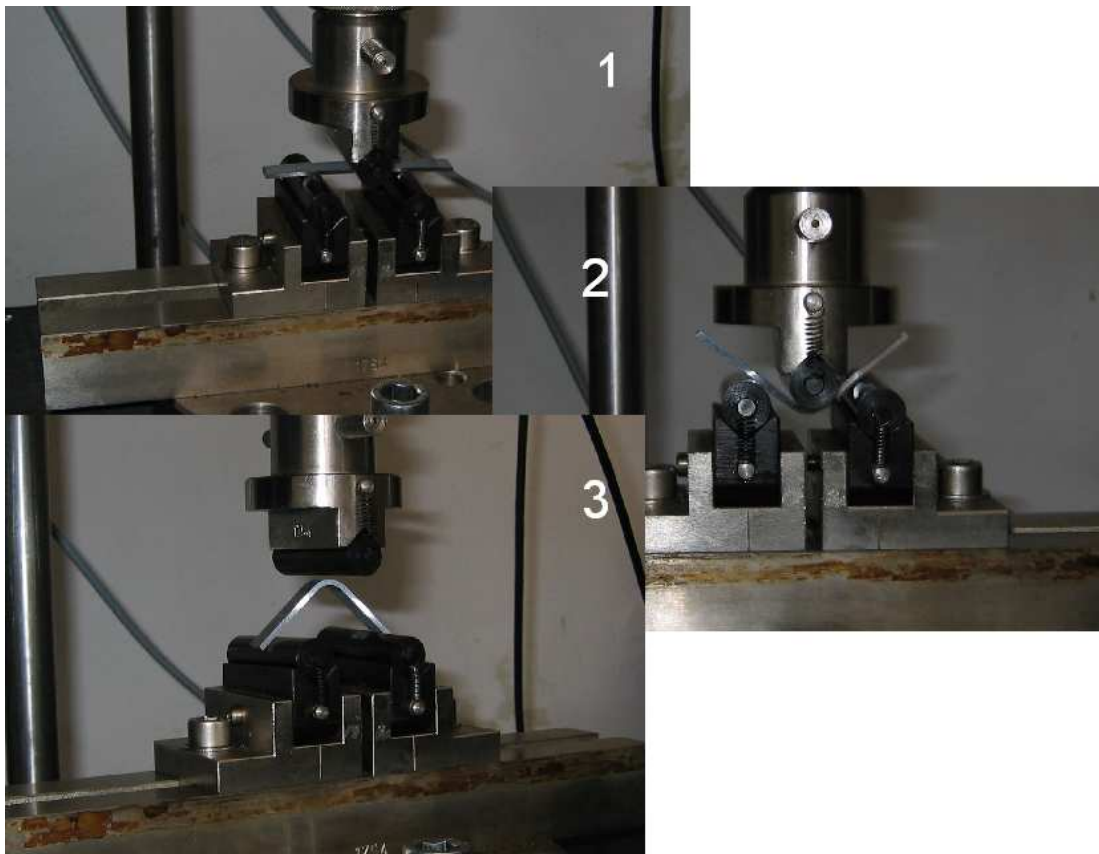
Obr.č. 22 Schematické znázornění přípravku na zkoušku ohybem

Poslední navrhovanou metodou zjišťování schopnosti zbytkové plasticity je pomocí Bauschingerova efektu. Ten vzniká vystavíme-li zkušební těleso změně smyslu působícího napětí. Při této změně je vidět snížení meze kluzu.

3.5.1 Postup zkoušky

1. Byli vytvořeny zkušební vzorky o rozměrech 10x80 mm, tloušťka dle druhu materiálu. Všechny vzorky byly broušeny z důvodu snížení rizika vzniku trhlin.
2. Ohnutím vzorku na maximální hodnotu (dle možností přípravku) byla získána kalibrační křivka a výchozí mez kluzu každého materiálu.
3. Ohybem na různé hloubky (tj. úhly) byli simulovány různé hodnoty plastické deformace. Hloubky byly 2, 4, 6, 8 a 10 mm.
4. Sledovali jsme pokles meze kluzu při zpětném ohybu do původní podoby vzorku.
5. Byly vypočteny změny $\Delta R_{p0,2}$ oproti původní hodnotě. Tyto hodnoty se následně připočetly k původní $R_{p0,2}$ nedeformovaného vzorku. Výsledná hodnota R musí odpovídat napětí na kalibrační křivce při dané deformaci. Ověření metody provedeme porovnáním těchto dvou hodnot.

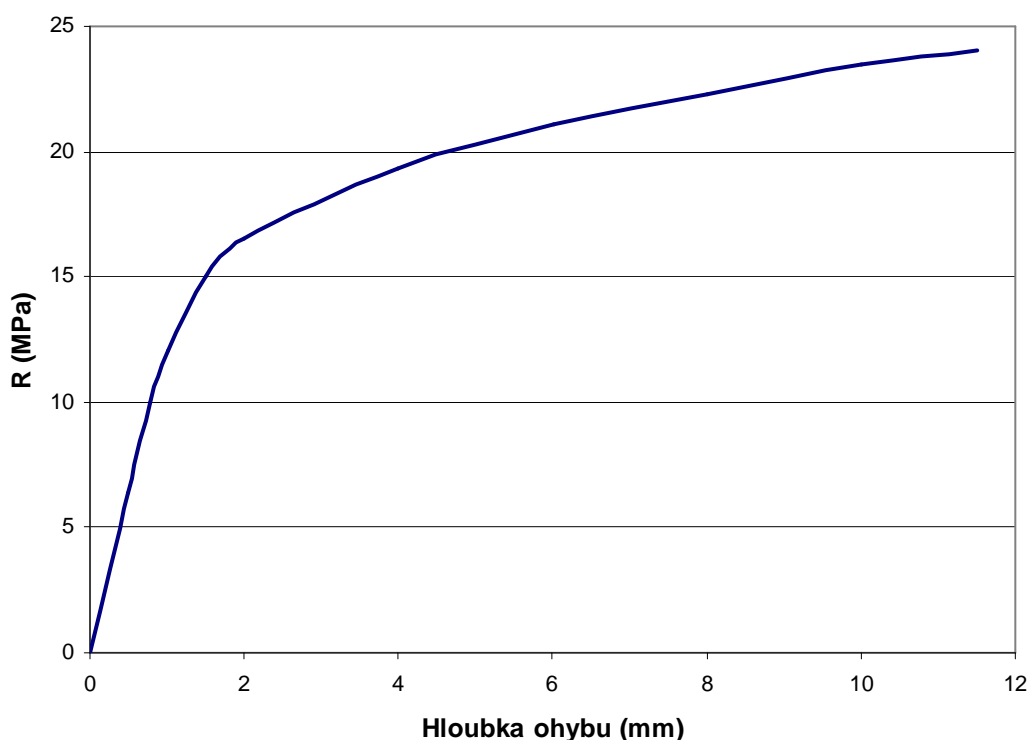
Ukázky ze zkoušky:



- 1 – Začátek ohýbání vzorku
- 2 – Ohnutí na požadovanou hloubku
- 3 – Obrácení vzorku a ohnutí do původního tvaru

3.5.1.1 RAK ocel

Kalibrační křivka:



Graf č. 8 Kalibrační křivka RAK oceli

Určení meze kluzu $R_{p0,2}$:

Z naměřených hodnot nám software LabTest v.3 vypočetl meze kluzu. Naměřeno bylo sedm vzorků u každé řady což představuje celkem 35 hodnot. Zjištěna mez kluzu u nedeformované RAK oceli je **$R_{p0,2}(1) = 12,51 \text{ MPa}$** .

Zpětným ohybem do původní polohy byly zjištěny následující meze kluzu:

Tab. č. 9 Naměřené hodnoty meze kluzu u zpětného ohybu u RAK oceli

Měření	Hloubka prvního ohybu (mm)				
	2	4	6	8	10
1	6,83	6,21	4,82	4,23	3,24
2	6,98	6,83	4,39	4,34	4,19
3	7,52	6,11	4,77	4,64	3,23
4	6,83	6,13	4,69	4,49	4,89
5	6,85	6,15	4,38	4,34	3,69
6	6,91	6,32	4,69	4,62	4,03
7	7,33	6,33	4,75	4,25	3,29
$R_{p0,2}(2)$ (MPa)	7,04	6,30	4,64	4,42	3,79

Z důvodu porovnání kalibrační křivky s vypočtenými hodnotami, se musí vypočítat úbytek napětí druhého ohybu vůči prvnímu a tento úbytek následně připočíst k hodnotě mez kluzu $R_{p0,2}$ (1).

Vypočetl jsem úbytek napětí meze kluzu u vzorků ohnutých na různé hloubky

$$U = R_{p0,2} (1) - R_{p0,2} (2) \quad (3)$$

Výsledné R zjištěné výpočtem:

$$R = R_{p0,2} (1) + U \quad (4)$$

Tab. č. 10 Hodnoty meze kluzu k porovnání s kalibrační křivkou

Napětí (MPa)	Hloubka ohybu (mm)				
	2	4	6	8	10
$R_{p0,2} (1)$	12,51				
$R_{p0,2} (2)$	7,04	6,30	4,64	4,42	3,79
U	5,47	6,21	7,87	8,09	8,72
R	17,98	18,72	20,38	20,60	21,23

Porovnání hodnot z kalibračního diagramu a hodnot vypočtených:

Tab. č. 11 Rozdíl hodnoty R zjištěné z kalibrační křivky a jednotlivých měření

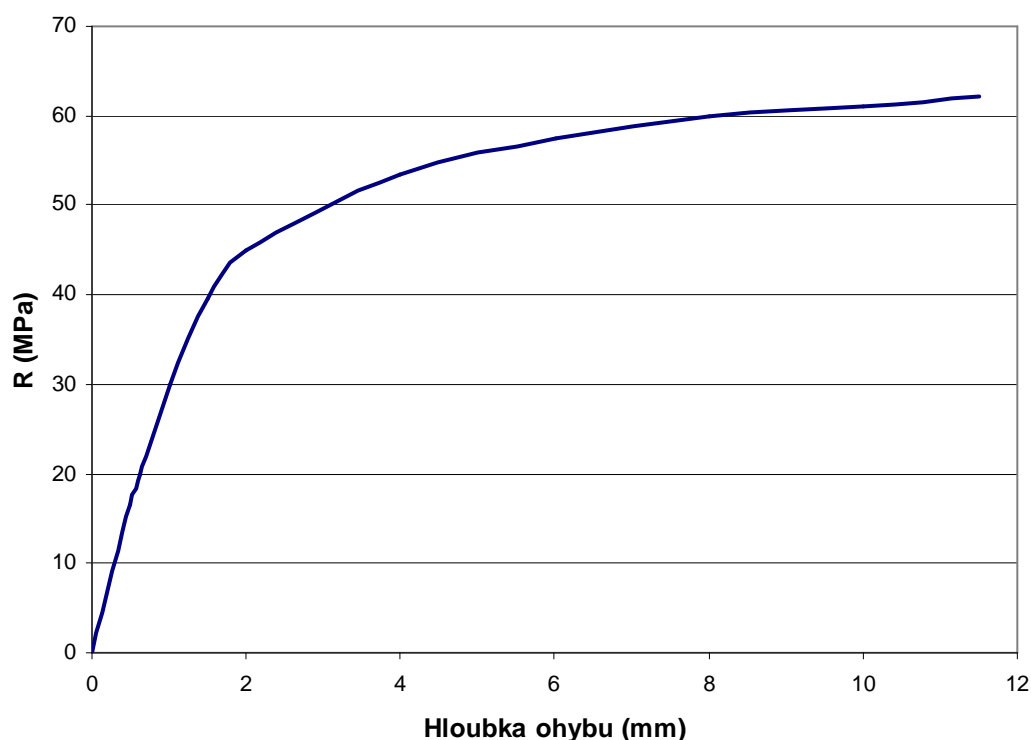
Hloubka (mm)	dle výpočtu	dle diagramu	rozdíl (%)
2	17,98	16,52	8,1
4	18,72	19,31	3,1
6	20,38	21,17	3,7
8	20,6	22,31	7,7
10	21,23	23,48	9,6

Zhodnocení:

Z tabulky č.11 je vidět, že maximální rozdíl mezi hodnotami zjištěnými z kalibrační křivky a hodnot vypočtených při „druhém“ ohybu do původního tvaru je maximálně 10%.

3.5.1.2 CP-W ocel

Kalibrační křivka:



Graf č. 9 Kalibrační křivka CP-W oceli

Určení meze kluzu $R_{p0,2}$:

Zjištěna mez kluzu u RAK oceli je $R_{p0,2}(1) = 34,26 \text{ MPa}$

Zpětným ohybem do původní polohy byly zjištěny následující meze kluzu:

Tab. č. 12 Naměření hodnoty meze kluzu u zpětného ohybu u CP-W oceli

Měření	Hloubka prvního ohybu (mm)				
	2	4	6	8	10
1	22,58	17,19	12,65	12,21	10,69
2	21,41	17,38	14,27	12,48	11,17
3	21,48	17,1	15,73	13,66	11,45
4	21,28	16,5	13,59	13,23	11,24
5	21,35	17,05	14,25	13,03	10,98
6	21,53	16,95	13,98	12,89	11,24
7	21,89	17,11	14,09	12,86	11,19
$R_{p0,2}(2)$ (MPa)	21,65	17,04	14,08	12,91	11,14

Tab. č. 13 Hodnoty meze kluzu k porovnání s kalibrační křivkou

Napětí (MPa)	Hloubka ohybu (mm)				
	2	4	6	8	10
R _{p 0,2} (1)	34,26				
R _{p 0,2} (2)	7,04	6,30	4,64	4,42	3,79
U	27,22	27,96	29,62	29,84	30,47
R	61,48	62,22	63,88	64,10	64,73

Tab. č. 14 Rozdíl hodnoty R zjištěné z kalibrační křivky a jednotlivých měření

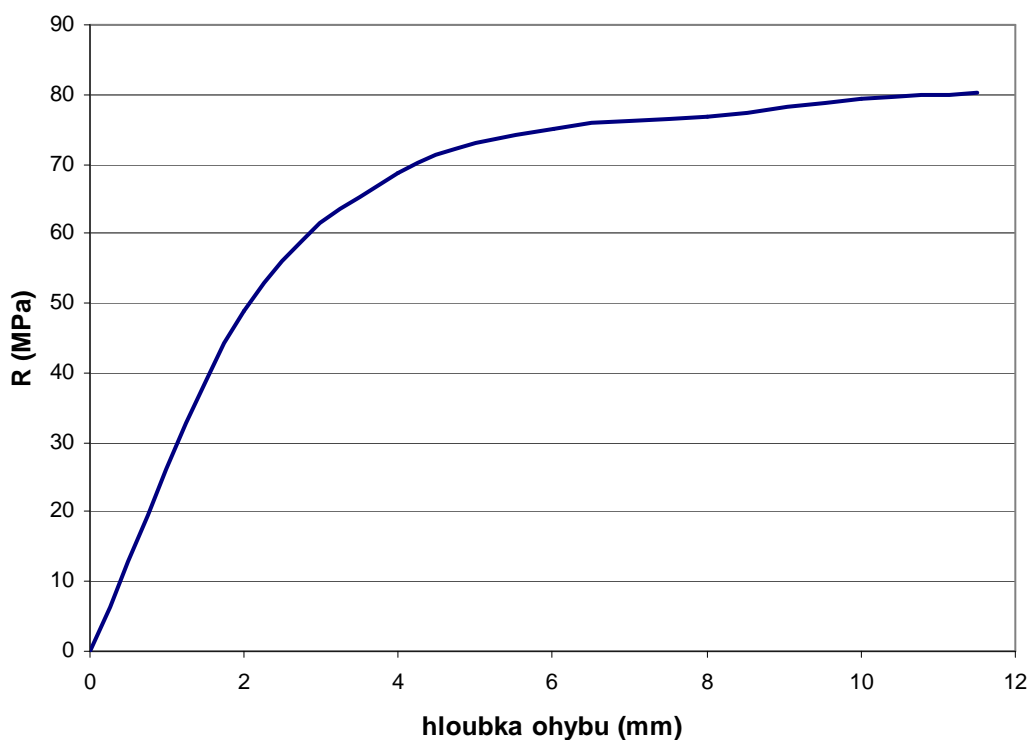
Hloubka (mm)	Dle výpočtu	dle diagramu	rozdíl (%)
2	46,87	45,23	3,5
4	51,48	53,52	3,8
6	54,44	57,48	5,3
8	55,51	59,86	7,3
10	57,38	61,03	6,0

Zhodnocení:

U CP-W oceli vyšel rozdíl mezi porovnávanými hodnotami malý což vypovídá o průkaznosti zkoušky.

3.5.1.3 MS-W ocel

Kalibrační křivka:



Graf č. 10 Kalibrační křivka MS-W oceli

Určení meze kluzu $R_{p0,2}$:

Zjištěna mez kluzu u RAK oceli je $R_{p0,2}(1) = 47,92 \text{ MPa}$

Zpětným ohybem do původní polohy byli zjištěny následující meze kluzu:

Tab. č. 15 Naměření hodnoty meze kluzu u zpětného ohybu u MS-W oceli

Měření	Hloubka prvního ohybu (mm)				
	2	4	6	8	10
1	41,4	26,35	22,18	22,28	19,26
2	41,71	26,37	24,45	20,97	18,34
3	42,25	26,29	24,74	21,54	20,36
4	42,26	26,29	24,24	22,04	17,52
5	42,05	26,32	23,78	21,68	18,59
6	41,75	26,37	24,15	21,43	19,23
7	41,98	26,35	24,32	22,02	18,26
$R_{p0,2}(2)$ (MPa)	41,91	26,33	23,98	21,71	18,79

Tab. č. 16 Hodnoty meze kluzu k porovnání s kalibrační křivkou

Napětí (MPa)	Hloubka ohybu (mm)				
	2	4	6	8	10
$R_{p0,2}(1)$	47,92				
$R_{p0,2}(2)$	41,91	26,33	23,98	21,71	18,79
U	6,01	21,59	23,94	26,21	29,13
R	53,93	69,51	71,86	74,13	77,05

Tab. č. 17 Rozdíl hodnoty R zjištěné z kalibrační křivky a jednotlivých měření

Hloubka (mm)	Dle výpočtu	dle diagramu	rozdíl (%)
2	53,93	48,99	9,2
4	69,51	68,75	1,1
6	71,86	74,96	4,1
8	74,13	76,89	3,6
10	77,05	79,32	2,9

Zhodnocení:

Zkouška byla průkazná i u posledního zkoumaného materiálu. Odchyly byly opět v řádu jednotek procent, což značí dobrou porovnatelnost.

3.5.2 Vyhodnocení měření:

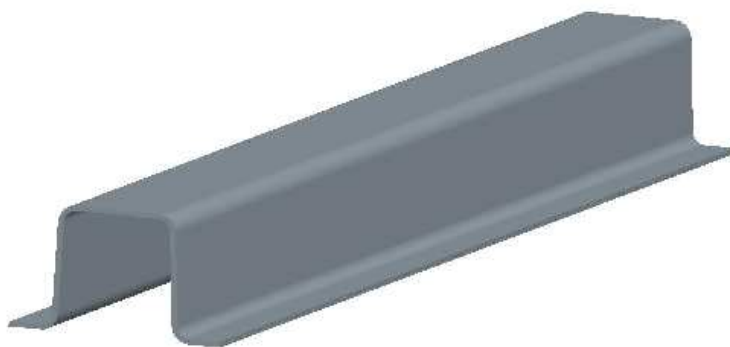
Poslední navrhovaná zkouška ukázala, že nejprůkaznější a také nejspíše nejvhodnější metodou k zjištění schopnosti zbytkové plastické deformace bude využití Bauschingerůva efektu. Všechny tři zkoumané materiály nevykazovaly větší odchylky mezi předpokládanou a změřenou hodnotou

meze kluzu. Maximální rozdíl nepřesáhl 10 %. Metodu lze použít pokud se výsledky zatíží chybou cca 10%.

3.6 Ověření metodiky na výlisku z vysokopevnostní oceli

3.6.1 Vysokopevnostní výztuha

Jednalo se o výztuhu automobilového prahu. Materiálem byl DOCOL 1200 (označení dle *Thyssen – Krup Stahl*), výztuha byla vyrobena válcováním za studena – tzv. roll forming (kap.2.5.2.1)



Obr.č. 23 Výztuha prahu

3.6.2 Mechanické hodnoty

K zjištění základních mechanických hodnot bylo nutno provést zkoušku tahem (kap.3.2). Vzorky byly odebrány ve směru válcování (0°). Protokol ze zkoušky tahem přiložen v přílohách.

Tab. č. 18 Mechanické hodnoty DOCOL 1200

DOCOL 1200	
R _{p 0,2} (MPa)	1125,44
R _m (MPa)	1258,27
A ₅₀ (%)	7,85

Ze zjištěných hodnot je vidět, že se tento materiál nejvíce blíží vlastnostem MS-W oceli. Z tohoto důvodu byla provedena pouze vrubová zkouška a zkouška ohybem (Bauschingerův efekt)

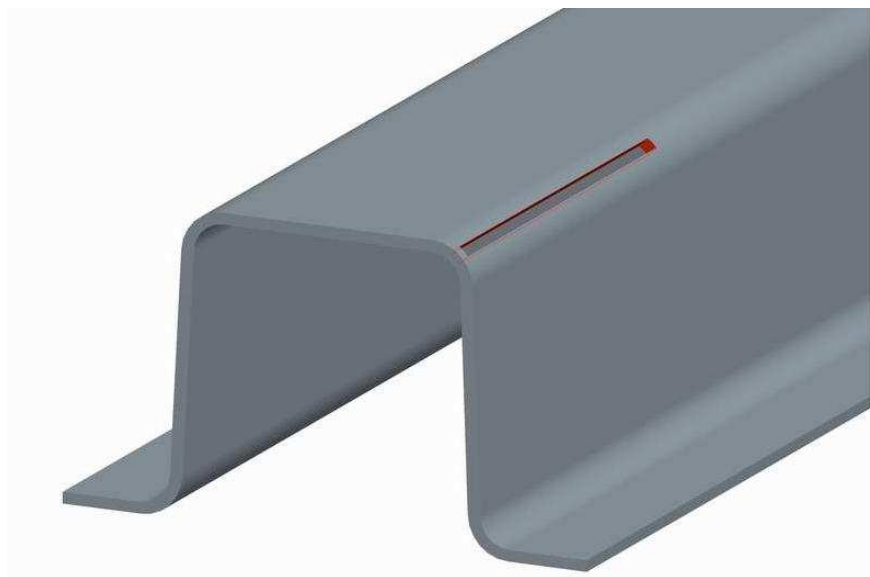
3.6.3 Zkouška tahem

Zkoušku byla využita na zjištění mechanických hodnot (kap.3.6.2) a následně byly zhotoveny tři řady vzorků. Z důvodu malého množství

zkušebního materiálů (byla dodána pouze jedna výztuha délky 1,5 m) se vyrobily pouze tři vzorky pro každou řadu. Jeden na zjištění mechanických hodnot, jeden nedeformovaný a tři deformované na cca 1; 1,5; 2 %. Tažnost (A_{50}) byla přes 7,8% ale meze pevnosti bylo dosaženo již při necelých 2% deformace. Kousek za mezí pevnosti byla poslední řada, větší deformace neměli význam z důvodu vzniku krčku.

3.6.4 Zkouška rázem

Podstatou bylo vytvořit kalibrační křivku pomocí nedeformovaného a tří různě deformovaných vzorků – závislost rázové práce na deformaci. Následně odebrat vzorek z výztuhy v místě ohybu (obr.č. 24) a určit kolik procent schopnosti plastické deformace bylo vyčerpáno již při výrobě výztuhy.

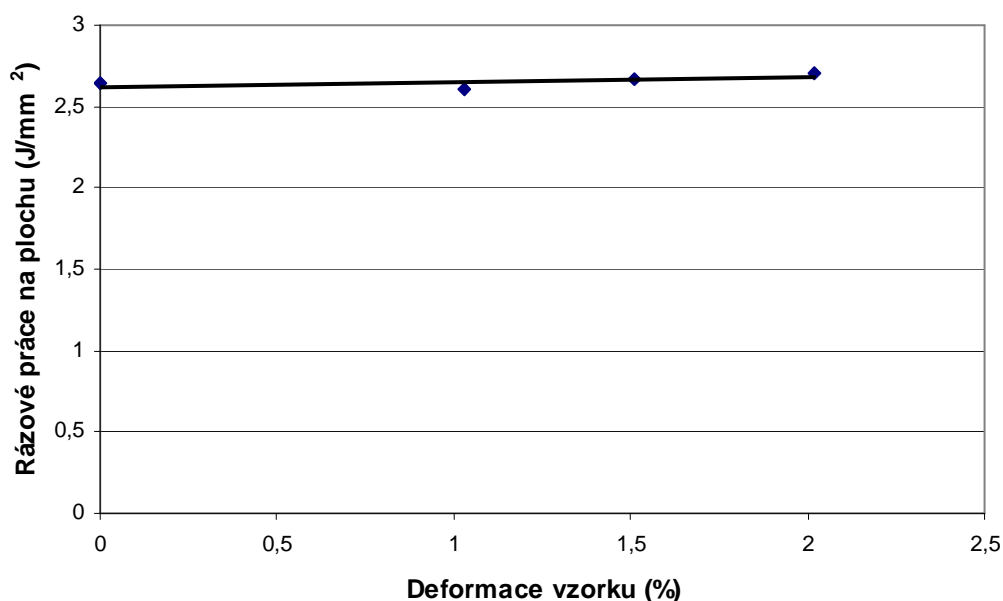


Obr.č. 24 Ukázka odběru vzorku pro rázovou zkoušku

Vzorek odebraný z deformovaného místa výztuhy musel být co nejmenší z důvodu správné deformace na Charpiho kladivu. Proto bylo nutno zjištěnou deformační energii přepočíst na plochu (J/mm^2).

Tab. č. 19 Hodnoty průměrné energie na přeražení pro kalibrační křivku

deformace (%)	Energie (J)	Plocha (mm ²)	Energie na plochu (J/mm ²)
0	49,0	18,51	2,647
1,03	48,2	18,51	2,603
1,51	49,5	18,51	2,674
2,02	50,1	18,51	2,707



Graf. č. 11 Závislost deformace vzorku z CP-W oceli na spotřebované energii

Tab. č. 20 Energie na přeražení u def. vzorku z místa ohybu

deformace (%)	Energie (J)	Plocha (mm ²)	Energie na plochu (J/mm ²)
-	10,8	4,10	2,634

3.6.4.1 Zhodnocení:

Ze zjištěných hodnot nelze určit jaké deformaci byl podroben odebraný vzorek z místa ohybu. Rozdíly mezi jednotlivými deformacemi jsou příliš malé a proto nelze tuto metodu považovat za vyhovující u vysokopevnostních plechů.

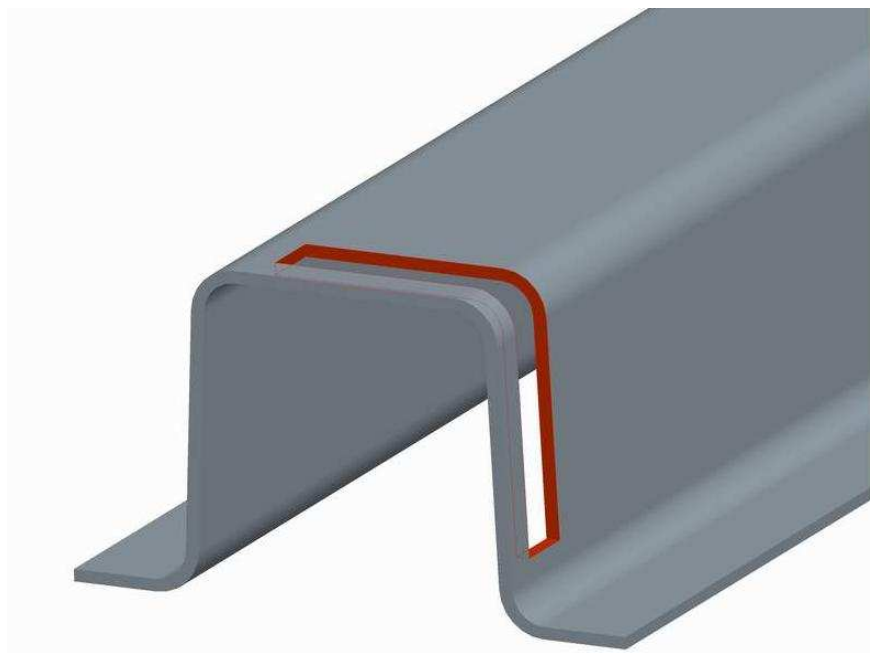
3.6.5 Zkouška ohybem

Pouze tato metoda jako jediná z námi navrhovaných zkoušek lze použít na zjištění schopnosti zbytkové plastické deformace. Proto se na tuto metodu kladl velký důraz.

3.6.5.1 Zkušební vzorky

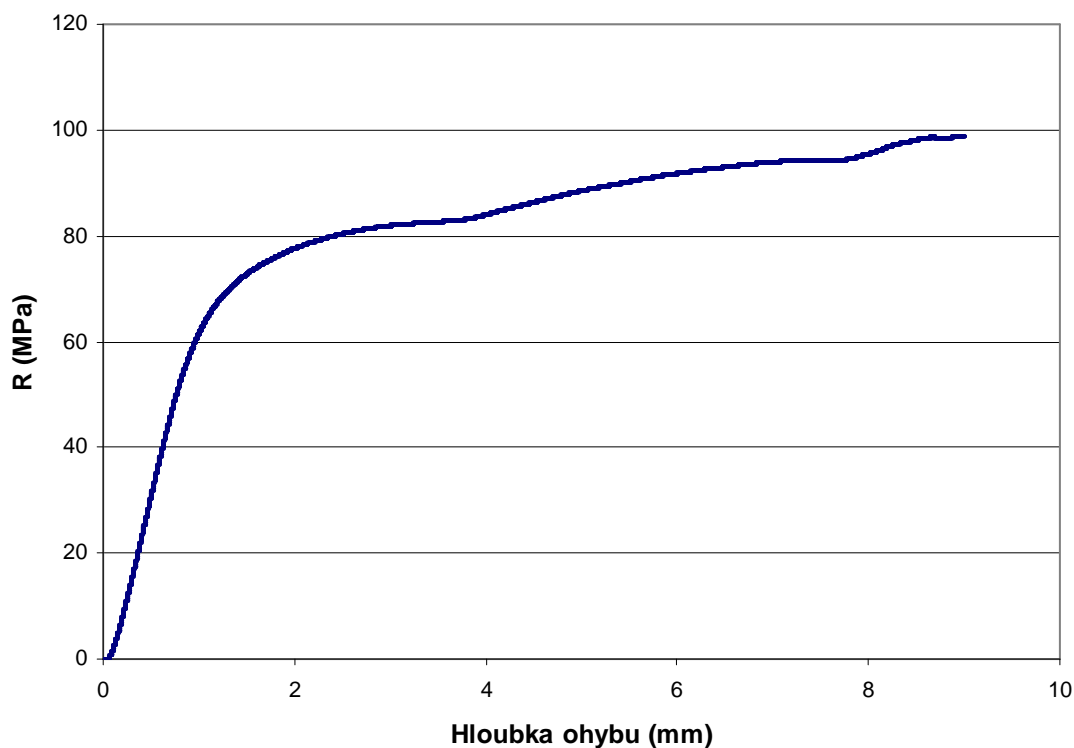
Vzorky pro kalibrační křivku byly odebrány ve směru válcování (0°) o rozměrech 15x80 mm, všechny byly frézovány a přebroušeny na stejný rozměr 10x80 mm.

Vzorky při zjištění skutečně vyčerpané schopnosti plastické deformace byly odebrány kolmo na směr válcování dle obr. 23.



Obr.č. 25 Ukázka odběru vzorku pro zkoušku ohybem

3.6.5.2 Kalibrační křivka



Graf č. 12 Kalibrační křivka u DOCOL 1200

Určení meze kluzu $R_{p0,2}$:

Zjištěna mez kluzu u DOCOL oceli je $R_{p0,2} (1) = 56,24 \text{ MPa}$

Zpětným ohybem do původní polohy byly zjištěny následující meze kluzu:

Tab. č. 21 Naměření hodnoty meze kluzu u zpětného ohybu u DOCOL 1200

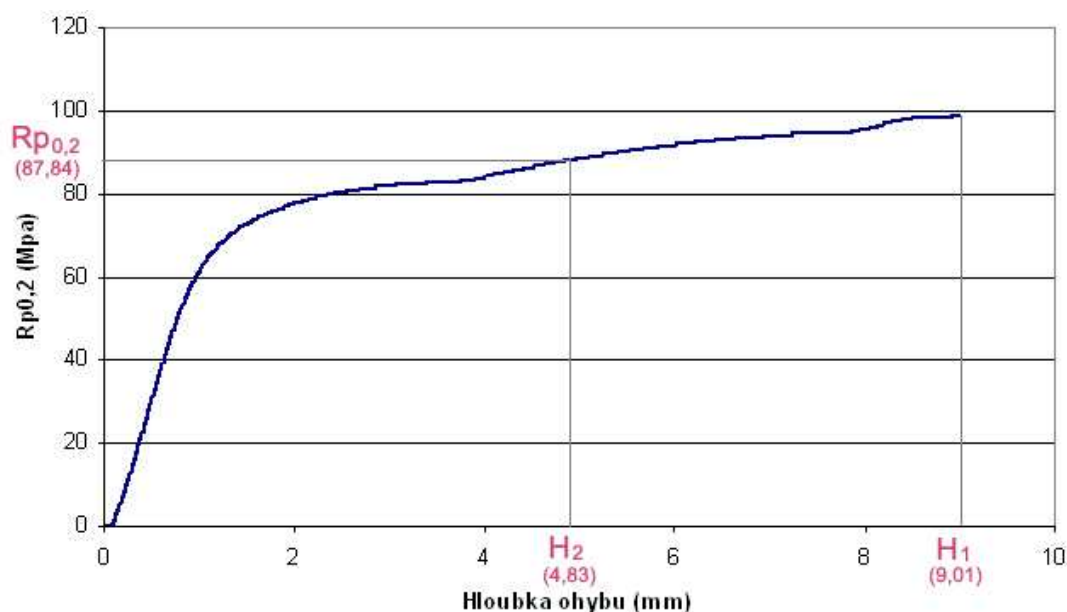
Měření	Hodnoty
1	24,11
2	24,81
3	24,46
Mez kluzu (MPa)	24,46

Tab. č. 22 Hodnota meze kluzu k porovnání s kalibrační křivkou

Napětí (MPa)	Hodnoty
$R_{p0,2} (1)$	56,24
$R_{p0,2} (2)$	24,64
U	31,60
$R_{p0,2}$	87,84

3.6.5.3 Nalezení hodnoty vyčerpané plasticity

Vycházelo se z deformace na mezi kluzu materiálu dané hloubkou ohybu H_1 zjištěnou z kalibračního grafu. Pomocí grafu odměřeno jaké hloubce H_2 odpovídá mez kluzu $R_{p0,2}$. Podílem hodnot „ $(H_2 / H_1) \cdot 100\%$ “ byla určena hodnota vyčerpané plasticity P . Schopnost zbytkové plastické deformace P^\vee materiálu je doplněk této hodnoty do 100%.



Graf. č. 13 Ukázka zjištění hodnot H_1 a H_2

Vyčerpaná plasticita:

$$P = \frac{H_2}{H_1} \cdot 100$$

$$P = \frac{4,83}{9,01} \cdot 100$$

$$P = 53,6\%$$

Schopnost zbytkové plastické deformace:

$$P^\vee = 100 - P$$

$$P^\vee = 100 - 53,6$$

$$P^\vee = 46,7\%$$

3.6.5.4 Vyhodnocení měření

Zkouška ohybem ukázala, že výztuha samotnou výrobou profilu vyčerpala cca 50% své schopnosti plasticity. V dalších výpočtech s tímto výliskem by se proto mělo počítat s tím, že materiál nemá totožné vlastnosti jako měl před zpracováním za studena. Deformované části ztratily 50%

plasticity, proto v těchto místech je při další deformaci velké riziko vzniku trhlin a následného porušení celistvosti celého výlisku.

4 DISKUZE ŘEŠENÍ

1, Zkouška tvrdosti

U zkoušky tvrdosti spočívá největší problém v umístění zkušebních vpichů a velikosti zatížení. U námi vyrobených vzorků se měřilo na vybroušené střížné hraně. Z tohoto důvodu bylo nutno volit malou zatěžující sílu, díky čemuž byl vpich malý a výsledek měření tvrdosti je ovlivněn místním složením materiálu.. Velký význam na hodnotu měřené tvrdosti mělo i umístění vpichu v závislosti na vzdálenosti od kraje materiálu. Pokud se vpich zhotovil příliš blízko kraji materiál se vybočil a měření muselo být opakováno.

Pokud by se měřila tvrdost u reálného výlisku v místě ohybu nastaly by další komplikace s umístěním zkušebního vpichu. Z důvodu rozdílné deformace v místě ohybu v závislosti na vzdálenosti od nedeformované nulové čáry. Mikrotvrdost se bohužel na měření také nehodí jelikož by se měřili tvrdosti jednotlivých fází a ne celková tvrdosti materiálu.

Zkouška tvrdosti nelze z těchto důvodu doporučit na hledání zbytkové plastické deformace.

2, Rázová zkouška

U rázové zkoušky vznikly největší problémy se správnou deformací vzorku během zkoušky. Stávající přípravek na uchycení zkušebního materiálu nebyl přizpůsoben přerážení štíhlých vzorků. Z tohoto důvodu musel být navrhnul a posléze vyroben nový přípravek. Díky této změně mohlo být provedeno měření. Měření bylo prováděno na Charpiho kladivu s rozsahem 0-300J. Námi měřené hodnoty dosahovaly tedy maximálně 25% pracovního rozsahu. Z tohoto důvodu bylo celé měření zatíženo značnou chybou. Tímto by se daly nejspíše vysvětlit i některé nekorektní průběhy závislosti rázové práce na deformaci (např.: u MS-W oceli). Zpřesnění celé zkoušky by pomohlo pracovní zařízení s menším pracovním rozsahem v našem případně např.: 0-100J. Rázová zkouška by se dala využít u materiálů s velkým

koeficientem zpevnění díky čemuž výrazně roste křehkost a zároveň klesá rázová práce.

Rázová zkouška pro vysokopevnostní materiály jakou jsou MS-W oceli lze použít jen obtížně.

3, Zkouška ohybem

U zkoušky ohybem s využitím Baushingerova efektu bylo zjištěno, že se tato metoda jako jediná z navrhovaných zkoušek dá využít na zjištění schopnosti zbytkové plastické deformace. Přesnost této metody na 3 druzích zkoušených materiálů byla velmi dobrá pohybovala se do 10%. Jedním z problému je mít sadu ohybníků s různými poloměry, aby tento poloměr odpovídal poloměru na výlisku. Zvýšení přesnosti měření by se dalo docílit větším počtem zkoumaných vzorků.

4, Zjištění zbytkové plastické deformace u dodaného výlisku

Ze 3 navrhovaných zkoušek byli provedeny pouze dvě. Jednalo se o materiál DOCOL 1200 který má nejbližší z námi zkoušených materiálů k MS-W oceli. Rázová zkouška byla provedena k potvrzení předpokladu, že se rázová energie nebude téměř měnit s deformací vzorku odebraného z výlisku. Všechny hodnoty rázové energie vyšly téměř totožné a z tohoto důvodu nebylo možné rozhodnout o vyčerpané plasticitě u vzorku odebraného v místě ohybu výlisku.

Na zkoušku ohybem byl kladen velký důraz z důvodu, že se jedna o jedinou metodu u které se prokázalo, že by šla použít i u vysokopevnostních ocelí. Zjištěná hodnota vyčerpané plastické deformace byla cca 50%.

5 ZÁVĚR

Tématem diplomové práce bylo zvolení vhodné metodiky zjišťování schopnosti zbytkové plastické deformace u dodaného výlisku. K tomuto účelu byly vybrány 3 metody zkoušek. Jednalo se o zkoušku tvrdosti, rázovou zkoušku a zkoušku v ohybu. Vhodnost použití jednotlivých typů zkoušek pro zjištění zbytkové deformace byla ověřována na laboratorních vzorcích. Na základě získaných výsledků z těchto zkoušek rozhodneme o vhodnosti dané metodiky k určení schopnosti zbytkové plastické deformace u daného výlisku. Z těchto metod se ukázala nejvhodnější zkouška ohybem s aplikováním Baushingerova efektu. Po provedení měření na výztuze z pevnostního plechu bylo zjištěno, že při výrobě ztratil výlisek cca 50% své schopnosti plastické deformace.

V rámci diplomové práce :

- byla provedena charakteristika pevnostních materiálů používaných pro stavbu karoserie automobilu (kap 2.2)
- bylo provedeno seznámení problematikou zpracování plechů se zvýšenými pevnostními hodnotami (kap. 2.5)
- byly navrženy metodiky zjištění zbytkové deformace výlisků z pevnostních plechů (kap 3.1 – 3.5).
- bylo provedeno experimentální zjištění zbytkové deformace u zvoleného výlisku z plechu (kap 3.6)
- byla vyhodnocena vhodnost použití zvolené metodiky měření (kap 4.)

V teoretické části byly popsány jednotlivé druhy ocelí jejich výroba a zpevňovací mechanismy

V praktické části byly navrženy a realizovány metody pro zjištění zbytkové plastické deformace. Vyhodnocena neprůkaznější metoda, která byla aplikována na daném výlisku z vysokopevnostní oceli.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MACEK, K a kol., *Nauka o materiálu II*, ČVUT Praha, 1999
- [2] Studijní materiály poskytnuté katedrou strojírenské technologie
- [3] PETRUŽELKA, J - BŘEZINA, R , *Tvařitelnost kovových materiálů*, Ostrava 2001
- [4] Norma ČSN EN 10002-1 „Kovové materiály –Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty“, únor 2002.
- [5] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. ISBN: 80-7204-248-3
- [6] <<http://www.atlas-spaceframe.de>>, [10.3. 2006].
- [7] <<http://www.fbmfg.thomasregister.com/olc/22717755/hydrofo.htm>>, [14.3. 2006].
- [8] PEARCE, P.: Sheet Metal Forming, ISBN 0-7503-0101-5
- [9] BOLJANOVIC, V.: Sheet Metal Forming Processes and Die Design, New York 2004 , ISBN 0-8311-3182-
- [10] Worldautosteel, International Iron And Steel Institute: Technical Info, 2004. Dostupné z <<http://www.worldautosteel.org/>>.
- [11] BILLY, J.: Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie. In.: Hutnické listy 1999. Vol 3, s 16-21.
- [12] PETRUŽELKA, J. – BŘEZINA, R.: Tvařitelnost kovových materiálů, VŠB, Ostrava 2001.
- [13] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. SNTL Praha 1989.

7 PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Zkoušky tahem jednotlivých materiálů

Příloha č. 2: Kotovaná skica přípravku

Příloha č. 1:

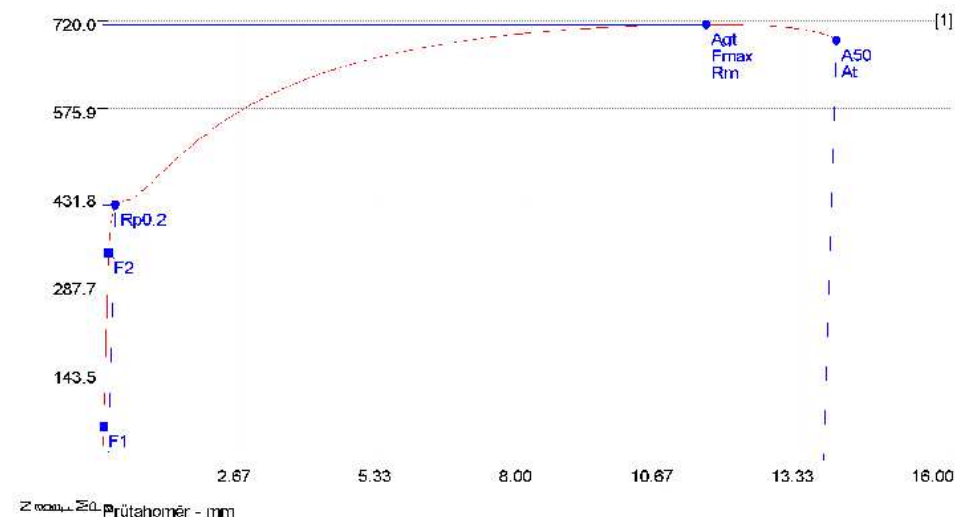
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Testovaný materiál :	RAK - broušeno	Zkouška provedena dle :	EN 10002
Plocha průřezu vzorku :	1,40 x10,40	Vypracoval :	Vytlačil Jan
Směr odebrání vzorku :	0°	Datum testu :	7.4.2006
Typ vzorku :	-----		
Rychlost posuvu :	10 mm/min.		

Výstupní hodnoty

Zkouška	R _m MPa	R _{p0.2} MPa	A ₅₀ %
1	713.31	417.84	27.28
x	-----	-----	-----
s	-----	-----	-----



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: +420 485 353374, +420 605957404

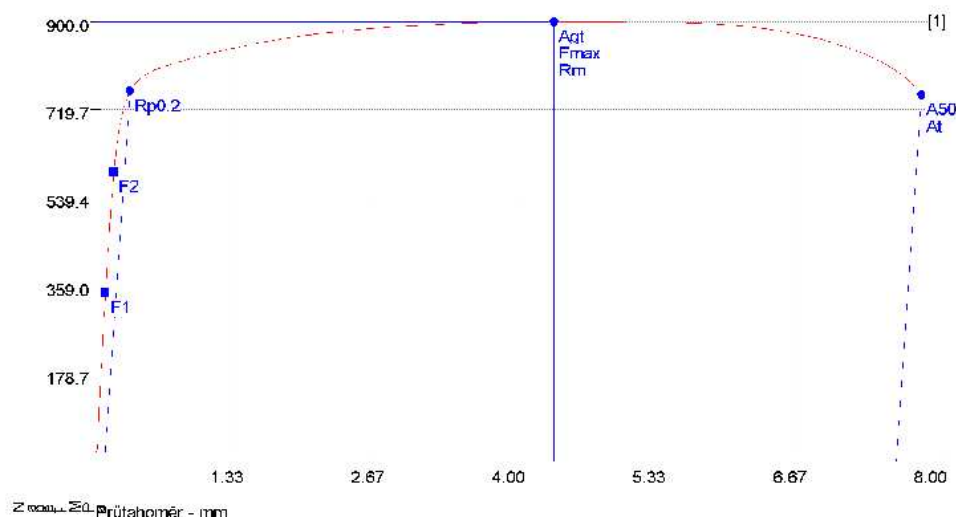
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Testovaný materiál :	CP-W broušeno	Zkouška provedena dle :	EN 10002
Plocha průřezu vzorku :	2,00 x10,50	Vypracoval :	Jan Vytlačil
Směr odebrání vzorku :	0°	Datum testu :	7.4.2006
Typ vzorku :	broušeno		
Rychlost posuvu :	10 mm/min.		

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	Rp0.2 MPa	A50 %
1	898.86	757.10	15.12
x	-----	-----	-----
s	-----	-----	-----



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: +420 485 353374, +420 605957404

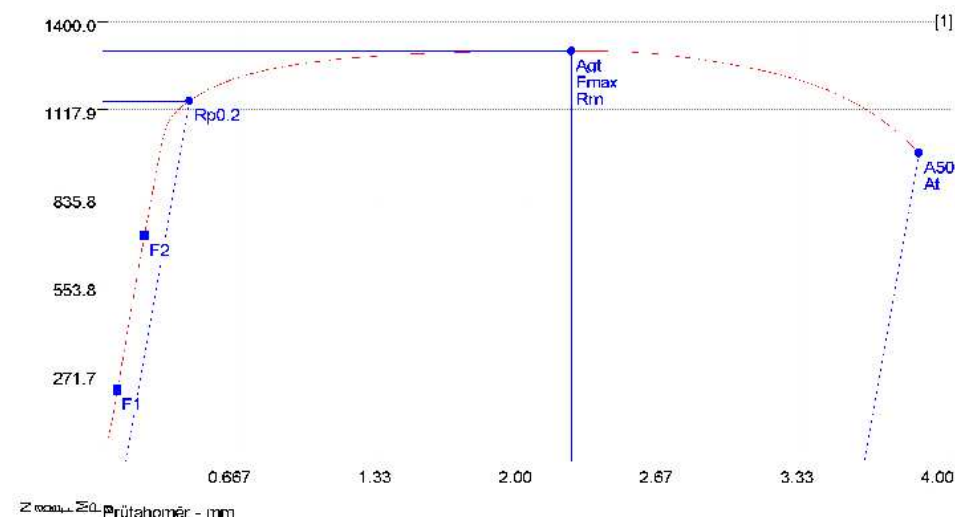
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Testovaný materiál :	MS-W broušeno	Zkouška provedena dle :	EN 10002
Plocha průřezu vzorku :	1,80 x 9,95	Vypracoval :	Vytlačil Jan
Směr odebrání vzorku :	0°	Datum testu :	10.4.2006
Typ vzorku :	-----		
Rychlost posuvu :	10 mm/min.		

Výstupní hodnoty

Zkouška	R _m MPa	R _{p0.2} MPa	A ₅₀ %
1	1305.15	1144.84	7.20
x	-----	-----	-----
s	-----	-----	-----



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: +420 485 353374, +420 605957404

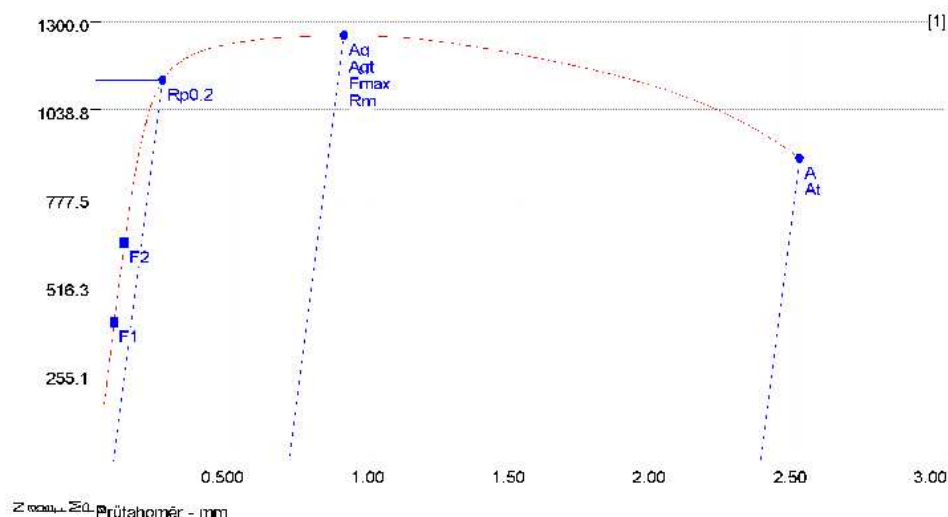
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Testovaný materiál :	DOCOL 1200	Zkouška provedena dle :	EN 10002
Plocha průřezu vzorku :	9,60x2,05	Vypracoval :	Jan Vytlačil
Směr odebrání vzorku :	0°	Datum testu :	25.4.2006
Typ vzorku :	-----		
Rychlost posuvu :	10 mm/min.		

Výstupní hodnoty

Zkouška	R _m MPa	R _{p0.2} MPa	A %
1	1258.27	1125.44	7.85
x	-----	-----	-----
s	-----	-----	-----



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: +420 485 353374, +420 605957404

The drawing shows a mechanical part with the following dimensions and features:

- Front View (Top):**
 - Total width: 82
 - Left flange width: 20
 - Distance between flange centers: 42
 - Right flange width: 35
 - Distance from right flange center to right edge: 60
 - Distance between hole centers: 55.5
 - Distance from right edge to right hole center: 45
 - Hole diameter: $\varnothing 10.5$
 - Surface texture symbol: $Ra 1.6$
- Side View (Bottom):**
 - Part thickness: 12
 - Flange thickness: 17
 - Flange outer diameter: 45
 - Internal hole diameter: 12
- Title Block:**

Název: **PRÍPRAVOK**
 Číslo: **DP-01-01**
 Miesto: **15.3.3004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**
 Vypracoval: **15.3.2004**
 Skontroloval: **15.3.2004**
 Schválil: **15.3.2004**
 Jméno: **15.3.2004**
 Příjmení: **15.3.2004**
 Podpis: **15.3.2004**
 Miesto: **15.3.2004**
 Dátum: **15.3.2004**

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci 26.června 2006

.....

Jan Vytlačil